



Escola Universitària d'Enginyeria  
Tècnica Industrial de Barcelona  
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## **Volum I**

Memòria – Annexos - Pressupost

TREBALL DE FI DE GRAU



TFG presentat per obtenir el títol de GRAU en  
ENGINYERIA de l'Energia  
Per **Maria Vilardell Rigau**

Barcelona, 9 de Juny de 2015

Director: Alfredo Guardo Zabaleta  
Departament de Mecànica de Fluids (729)  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)



## **AGRAIMENTS**

Vull agrair a totes les persones que en el transcurs d'aquest projecte han ofert la seva ajuda, coneixements o simplement el seu suport per aconseguir portar aquest projecte a bon port.

Específicament voldria destacar al professor Alfredo Guardo per haver-me permès embarcar-me en aquest projecte tan enriquidor i la seva predisposició i ajuda. També al grup de recerca CDIF, Centre de Diagnòstic Industrial i Fluidodinàmica, per poder contribuir en un dels seus projectes i facilitar les eines adients per a la realització d'aquest treball.

Agraïr al Consorci de Serveis Universitaris de Catalunya (CSUC) per facilitar l'accés als seus equips de supercomputació pel desenvolupament d'aquest treball.

Als meus pares, companyes de pis i amics per donar-me sempre confiança i ànims. Sense tots ells i elles hagués sigut impossible finalitzar aquest projecte. Finalment també a l'Amanda García.

## RESUM

Els models matemàtics descriuen amb la màxima precisió possible un sistema per mitjà del llenguatge matemàtic. Els models de turbulència són aquells que volen llegir i predir el comportament d'un fluid, normalment turbulent. Al llarg de la seva història han anat apareixent models que descriuen de millor o pitjor manera el comportament d'un fluid. Actualment els models de turbulència són indispensables pel disseny de màquines hidràuliques. És necessari predir quin serà el comportament del fluid al llarg del seu recorregut pels àleps hidrodinàmics per preveure possibles danys, com pot ser la fallada per ruptura. Aquest és un fenomen causat per l'acoblament de freqüències, o ressonància, entre la freqüència del desprendiment de vòrtex i la del material.

La forma de l'acabament d'un àlep o truncament és essencial per prevenir aquest fallada. El truncament Donaldson té un comportament únic, permet augmentar molt la freqüència del desprendiment de vòrtex alhora que disminueix l'amplitud de la vibració de l'àlep. Gràcies a un estudi experimental realitzat per A. Zobeiri (2012) s'ha entès físicament el seu comportament. A partir d'aquest treball es va voler predir el seu comportament utilitzant models de turbulència amb CFD (Computational Fluid Dynamics). Els resultats que es van obtenir no van ser prou ajustats a les mesures experimentals.

El present projecte pretén calibrar el model de turbulència SAS (Scale-Adaptive Simulation) per tal que s'adeqüi al comportament de l'aigua al voltant de l'àlep amb truncament Donaldson. Per aconseguir-ho s'ha realitzat un estudi paramètric del model, modificant el valor de tres variables diferents. La valoració dels resultats s'ha realitzat qualitativament, analitzant els perfils de velocitats i la predicció de la zona laminar-turbulent de la capa límit, i quantitativament, comparant la freqüència de vòrtex amb la real del perfil. Finalment, s'ha obtingut un calibratge acceptable i millorat respecte el model inicial. Tot i no haver modelitzat completament el comportament del fluid al llarg del seu recorregut per l'àlep, modificant un 100% el paràmetre  $\beta$  del model s'obté un resultat satisfactori. El model SAS fa una bona predicció de la zona laminar d'un fluid però no de la zona de transició laminar-turbulent, fent que es sobre dimensioni la zona de transició i que, com a conseqüència, la capa límit augmenti.

## **RESUMEN**

Los modelos matemáticos describen con la máxima precisión posible un sistema mediante el lenguaje matemático. Los modelos de turbulencia son aquellos que leen y predicen el comportamiento de un fluido, normalmente turbulento. Al largo de su historia han ido apareciendo modelos que describen de mejor a peor manera el comportamiento de un fluido. Actualmente los modelos de turbulencia son indispensables por el diseño de máquinas hidráulicas. Es necesario predecir cuál será el comportamiento del fluido durante su recorrido por los álabes hidrodinámicos para prevenir posibles daños, como puede ser el de ruptura. Este fenómeno causado por el acoplamiento de frecuencias, o resonancia, entre la frecuencia de desprendimiento de vórtice y la del material.

La forma del final de un álabe o truncamiento es esencial para prevenir este fallo. El truncamiento Donaldson tiene un comportamiento único que permite aumentar mucho la frecuencia del desprendimiento de vórtice al mismo tiempo que disminuye la amplitud de la vibración del alabe. Gracias a un estudio experimental realizado por A. Zobeiri (2012) se ha podido entender físicamente su comportamiento. A partir de este trabajo se quería predecir su comportamiento utilizando los modelos de turbulencia con CFD (Computational Fluid Dynamics). Los resultados que se obtuvo no eran suficientemente ajustados a las medidas experimentales.

El presente proyecto quiere calibrar el modelo de turbulencia SAS (Scale-Adaptive Simulation) para que se adecue al comportamiento del agua alrededor del alabe con truncamiento Donaldson. Para conseguirlo se ha realizado un estudio paramétrico del modelo modificando el valor de tres variables diferentes. La valoración de los resultados se ha realizado cualitativamente, analizando los perfiles de velocidad y la predicción de la zona laminar-turbulenta de la capa límite, y cuantitativamente, comparando la frecuencia de vórtice con la real del perfil. Finalmente, se obtuvo una calibración aceptable y mejorado respecto el modelo inicial. A pesar de no haber modelizado completamente el comportamiento del fluido al largo de su recorrido por el alabe, modificando un 100% el parámetro  $\beta$  del modelo se obtiene un resultados satisfactorio. El modelo SAS hace una buena predicción de la zona laminar de un fluido pero no de la zona de transición laminar-turbulenta, haciendo que se sobredimensione la zona de transición y que, como consecuencia, la capa límite aumente.

## **SUMMARY**

Mathematical models describe a system precisely using mathematical language. Turbulence models claim to read and display fluid behaviour, which is usually turbulent. For years, different types of turbulent models have been created to improve upon previous models, each of them having different characteristics to describe fluid behaviour. Nowadays, turbulent models are essential to design hydraulic machines. It is necessary to predict what the fluid behaviour will be like during its way through the hydrofoils to reduce any possible damage, as there could be a crack. This phenomenon occurs when the vortex shedding frequency and the natural frequency of the machine match, resonate or lock-in, producing a large vibration.

Trailing edge shape is essential to prevent this fatal ending. Donaldson's trailing edge is well-known to minimize the vibration of the hydrofoil and increase the vortex shedding frequency. Thanks to an experimental study by A. Zobeiri (2012) it has been possible to understand physically its magnificent behaviour. Later, there was a study that aimed to predict Donaldson trailing edge's behaviour using turbulence models by CFD (Computational Fluid Dynamics). The results did not adjust to the experimental data.

The present project intends to calibrate the SAS turbulent model (Scale-Adaptive Simulation) to adjust water behaviour through the trailing edge Donaldson hydrofoil. To achieve this objective, a parametric study of the model has been done by modifying three different constants. The numerical research has been done qualitatively, analysing the velocity profiles and predicting the laminar-to-turbulent transition zone, and quantitatively, comparing the vortex shedding frequency with the experimental one. The calibration has been performed by obtaining a more precise model compared to the initial one. Although the modulation is not achieved in every part, modifying  $\beta$  parameter 100% of its initial value can produce a good result. The SAS model predicts considerably well the laminar zone, despite not performing as well in the laminar-to-turbulent transition zone, which leads to an overestimation boundary layer.

# ÍNDIX

Agraïments .....	i
Resum.....	ii
Resumen .....	iii
Summary .....	iv
Índex .....	v
Índex figures.....	vii
Índex taules.....	ix
Nomenclatura.....	xi
Memòria .....	1
Capítol 1: Introducció.....	3
1.1. Motivació .....	3
1.1.1. Estudi de la capa límit .....	4
1.1.2. Desenvolupament de la vorticitat.....	5
1.1.3. Comportament de la vorticitat .....	8
1.1.4. Freqüència natural .....	8
1.1.5. Acoblament de les freqüències.....	8
1.1.6. Àleps utilitzats.....	9
1.1.7. Dinàmica de fluids computacional .....	11
1.2. Objectius .....	12
1.3. Abast.....	12
Capítol 2: Marc teòric.....	13
2.1. Equacions fonamentals .....	14
2.1.1. Equació de conservació de la massa .....	14
2.1.2. Equacions de la quantitat de moviment .....	14
2.2. Models de turbulència.....	15

2.2.1.	Model SAS .....	18
2.2.2.	Aplicació del model SAS.....	21
Capítol 3: Metodologia.....		23
3.1.	Superfície de control.....	23
3.2.	Mallat .....	24
3.3.	Condicions de contorn .....	25
3.4.	Condicions de simulació .....	25
3.5.	Paràmetres de la simulació.....	29
3.6.	Mètodes de tractament de dades .....	30
Capítol 4: Resultats i discussió .....		31
4.1.	Cas base .....	31
4.2.	Estudi paramètric del model de turbulència SAS.....	35
4.3.	Exploració de camins .....	40
4.4.	Estudi paramètric avançat del model de turbulència SAS.....	41
Capítol 5: Estudi ambiental .....		51
Capítol 6: Conclusions .....		52
Capítol 7: Bibliografia .....		54
7.1.	Referències bibliogràfiques .....	54
7.2.	Bibliografia de consulta .....	55
Annexos .....		57
I.	Comparativa intensitats de turbulència per l'estudi paramètric .....	59
II.	Comparativa intensitat de turbulència de l'estudi paramètric avançat .....	65
Pressupost.....		69



## ÍNDEX FIGURES

<b>Figura 1:</b> Vòrtexs als deixants d'un àlep. ....	5
<b>Figura 2:</b> Despreniment de vòrtexs al deixant d'un àlep. A) Distribució de velocitats en dos instants de temps $t_1$ i $t_2$ . B) Distribució de pressions. <b>Font:</b> [2]	6
<b>Figura 3:</b> Règim d'un fluid en passar a través d'un cilindre circular. <b>Font:</b> [3]....	7
<b>Figura 4:</b> Remolins o també anomenats estela de Von Kármán de la illa Jan Mayen (Noruega). <b>Font:</b> NASA.....	8
<b>Figura 5:</b> Perfil hidrodinàmic NACA 0009 amb truncament Donaldson. <b>Font:</b> [5] .....	9
<b>Figura 6:</b> Diferents truncaments d'àlep fets per Donaldson. <b>Font:</b> [5] .....	10
<b>Figura 7:</b> Estela del perfil hidrodinàmic. ....	11
<b>Figura 8:</b> Evolució temporal de la velocitat en un flux turbulent.....	16
<b>Figura 9:</b> Cilindre on es creua flux amb un Reynolds de $3 \cdot 10^6$ ; esquerra-URANS, dreta-SAS, L-longitud d'escala turbulenta i D-diàmetre del cilindre. <b>Font:</b> [6] ..	18
<b>Figura 10:</b> Estructura de la turbulència darrera l'àlep. <b>Font:</b> [6] .....	22
<b>Figura 11:</b> Power espectra de l'àlep NACA0021: esquerra- power spectral density del coeficient lift, dreta- power spectral density del coeficient drag. <b>Font:</b> [6].....	22
<b>Figura 12:</b> Volum de control utilitzat pel calibratge del model. ....	23
<b>Figura 13:</b> Visió general de la malla.....	24
<b>Figura 14:</b> Detalls de la malla- a l'esquerra: detall de la zona del perfil; a la dreta: canvi de mallat al deixant. ....	24
<b>Figura 15:</b> Condicions de contorn per cada línia. ....	25
<b>Figura 16:</b> Paràmetres definits en el solver del programa. ....	26
<b>Figura 17:</b> Talls en el perfil per l'obtenció de dades. ....	28
<b>Figura 18:</b> Punts a la capa límit del perfil per l'obtenció de dades. ....	28
<b>Figura 19:</b> Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep pel cas base.....	33
<b>Figura 20:</b> Senyal de la força de sustentació, lift, pel cas base. ....	33
<b>Figura 21:</b> Freqüència del despreniment de vòrtex de la força de sustentació, lift, pel cas base gràcies a la transformada de Fourier. ....	34
<b>Figura 22:</b> Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas base.....	35

<b>Figura 23:</b> Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un -10% el paràmetre $\alpha^*$ .....	36
<b>Figura 24:</b> Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un +10% el paràmetre $\alpha^*$ .....	36
<b>Figura 25:</b> Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un -10% el paràmetre $\beta^*$ .....	37
<b>Figura 26:</b> Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un +10% el paràmetre $\beta^*$ .....	38
<b>Figura 27:</b> Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un -10% el paràmetre Cs.....	39
<b>Figura 28:</b> Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un -10% el paràmetre Cs.....	39
<b>Figura 29:</b> Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un -100% el paràmetre $\alpha^*$ .....	42
<b>Figura 30:</b> Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un -200% el paràmetre $\alpha^*$ .....	43
<b>Figura 31:</b> Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un -300% el paràmetre $\alpha^*$ .....	43
<b>Figura 32:</b> Senyal de la força lift per la simulació modificant un -300% el paràmetre $\alpha^*$ .....	44
<b>Figura 33:</b> Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un +100% el paràmetre $\beta^*$ .....	45
<b>Figura 34:</b> Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un +200% el paràmetre $\beta^*$ .....	45
<b>Figura 35:</b> Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un +300% el paràmetre $\beta^*$ .....	46
<b>Figura 36:</b> Senyal de la força de sustentació, lift, pel cas quan $\beta$ augmenta un 100% el valor inicial.....	47
<b>Figura 37:</b> Freqüència del desprendiment de vòrtex de la força de sustentació, lift, pel cas quan $\beta$ augmenta un 100% el valor inicial, gràcies a la transformada de Fourier. ....	48
<b>Figura 38:</b> ..Anàlisis del power spectrum density de la fluctuació de la velocitat a la capa límit al 40% de la llargada del perfil hidrodinàmic pel cas $\beta^*+100\%$ . Esquerra: zona de succió. Dreta: zona de pressió. ....	48
<b>Figura 39:</b> ..Anàlisis del power spectrum density de la fluctuació de la velocitat a la capa límit al 50% de la llargada del perfil hidrodinàmic pel cas $\beta^*+100\%$ . Esquerra: zona de succió. Dreta: zona de pressió. ....	48
<b>Figura 40:</b> ..Anàlisis del power spectrum density de la fluctuació de la velocitat a la capa límit al 70% de la llargada del perfil hidrodinàmic pel cas $\beta^*+100\%$ . Esquerra: zona de succió. Dreta: zona de pressió. ....	49
<b>Figura 41:</b> ..Anàlisis del power spectrum density de la fluctuació de la velocitat a la capa límit al 90% de la llargada del perfil hidrodinàmic pel cas $\beta^*+100\%$ . Esquerra: zona de succió. Dreta: zona de pressió. ....	49

<b>Figura 42:</b> Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas base.....	50
<b>Figura 43:</b> Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas $\alpha^* -10\%$ . ....	60
<b>Figura 44:</b> Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas $\alpha^* +10\%$ . ....	61
<b>Figura 45:</b> Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas $\beta^* -10\%$ . ....	62
<b>Figura 46:</b> Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas $\beta^* +10\%$ . ....	63
<b>Figura 47:</b> Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas $C_s -10\%$ . ....	63
<b>Figura 48:</b> Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas $C_s +10\%$ . ....	64
<b>Figura 49:</b> Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas $\beta^* +200\%$ . ....	66
<b>Figura 50:</b> Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas $\beta^* +300\%$ . ....	67

## ÍNDEX TAULES

<b>Taula 1:</b> Valors dels coeficients <i>lift</i> i <i>drag</i> per NACA21 a 60° d'angle d'atac. ....	22
<b>Taula 2:</b> Propietats de l'aigua utilitzades en el present projecte. ....	27
<b>Taula 3:</b> Valors de referència per les simulacions. ....	27
<b>Taula 4:</b> Posició de les línies en el perfil hidrodinàmic. ....	28
<b>Taula 5:</b> Posició dels punts en el perfil hidrodinàmic. ....	29
<b>Taula 6:</b> Paràmetres del model SAS. ....	29
<b>Taula 7:</b> Constants del model SAS que es modificaran pel calibratge. ....	32
<b>Taula 8:</b> Valor de les constants modificades del model SAS per cada estudi paramètric. ....	35
<b>Taula 9:</b> Freqüències del desprendiment de vòrtex per diferents simulacions a partir de la força <i>lift</i> i del caudal volumètric. ....	40
<b>Taula 10:</b> Errors relatius de les freqüències del desprendiment de vòrtex per diferents simulacions a partir de la força <i>lift</i> i del caudal volumètric respecte la freqüència experimental. ....	41
<b>Taula 11:</b> Constants escollides i modificades de la parametrització. ....	41
<b>Taula 12:</b> Freqüències del desprendiment de vòrtex per l'estudi paramètric avançat a partir de la força <i>lift</i> i del caudal volumètric. ....	46

<b>Taula 13:</b> Errors relatius de les freqüències del despreniment de vòrtex per les simulacions de l'estudi paramètric avançat a partir de la força <i>lift</i> i del caudal volumètric respecte la freqüència experimental. ....	47
<b>Taula 14:</b> Càlcul de les emissions de CO <sub>2</sub> .....	51
<b>Taula 15:</b> Base imposable desglossada.....	71
<b>Taula 16:</b> Import final del pressupost després d'haver aplicat taxes. ....	71

## NOMENCLATURA

$C_s$	Paràmetre que permet modificar la localització de la zona de transició	
$f$	Fracció mixta	
$F_1$	Funció d'esmoreïment	
$G_k$	Generació d'energia cinètica turbulenta	
$G_\omega$	Generació de dissipació específica	
$k$	Energia cinètica específica	(m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
$k, k_c$	Coefficient de transferència de massa	(varies unitats)
$\ell, l, L$	Longitud	(m)
$m$	Massa	(g, kg)
$\dot{m}$	Taxa de flux màssic	(kg/s)
$M_T$	Número de Mach (relació de la velocitat del fluid amb la velocitat del so local)	
$p$	Pressió	(Pa, atm, mm Hg)
$Q$	Taxa de flux d'entalpia	(W)
$Re$	Número de Reynolds → Taxa de forces inercials i forces viscoses	
$S$	Mesura invariant del rati de pressió	(s <sup>-1</sup> )
$S_{ij}$	Velocitat mitja del tensor tensions	(s <sup>-1</sup> )
$t$	Temps	(s)
$U$	Velocitat de flux lliure	(m/s)
$u, v, w$	Magnitud de la velocitat	(m/s)
$V$	Volum	(m <sup>3</sup> )
$\vec{v}$	Vector de velocitat absoluta	(m/s)

$Y$	Fracció màssica
$X$	Fracció molar

#### LLETRES GREGUES

$\alpha$	Difusivitat tèrmica	(m <sup>2</sup> /s, ft <sup>2</sup> /s)
$\alpha$	Fracció volumètrica	
$\alpha^*$	Amortiment de la viscositat turbulenta i corregeix el número de Reynolds baix	
$\beta$	Coefficient d'expansió tèrmica	(K <sup>-1</sup> )
$\beta^*$	Dissipació d'energia cinètica turbulenta	
$\Gamma$	Difusivitat de l'energia cinètica turbulent	
$\Delta$	Canvi de la variable, final – inicial (per exemple, $\Delta p$ , $\Delta t$ , $\Delta H$ , $\Delta S$ , $\Delta T$ )	
$\eta$	Factor d'eficiència	
$\kappa$	Constant de Von Kármán	
$\mu$	Coefficient de viscositat dinàmica	(cP, Pa·s)
$\nu$	Coefficient de viscositat cinemàtica	(m <sup>2</sup> /s)
$\rho$	Densitat	(kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	Tensió superficial	(kg/m)
$\sigma_s$	Coefficient de dispersió	(m <sup>-1</sup> )
$\sigma_k / \sigma_\omega$	Constants de turbulència de Prandtl	
$\tau$	Tensor tallant	(Pa)
$\tau$	Escala temporal, per exemple, $\tau_c$ , $\tau_p$ , $\tau_c$	(s)
$\Omega$	Velocitat angular; $\Omega_{ij}$ , Tensor de rotació mitja	(s <sup>-1</sup> )
$\omega$	Taxa de dissipació específica	(s <sup>-1</sup> )

## SUBÍNDIX

k	Energia cinètica
t	Qualitat turbulent
$\omega$	Qualitat dissipativa
i, j	Subíndex direccional a les coordenades cartesianes







Escola Universitària d'Enginyeria  
Tècnica Industrial de Barcelona  
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## Memòria

# **“Estudi CFD del flux turbulent al voltant d'àleps de turbomàquines amb model SAS”**

TFG presentat per optar al títol de GRAU en  
ENGINYERIA de l'Energia  
per **Maria Vilardell Rigau**

Barcelona, 9 de Juny de 2015

Director: Alfredo Guardo Zabaleta  
Departament MF (729)  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)



# Capítol 1:

# INTRODUCCIÓ

## 1.1. Motivació

Tot i que el fenomen del despreniment de vòrtex sigui un dels camps d'estudi més recents en la mecànica de fluids, l'efecte que pot causar és ben conegut des de fa molt temps enrere. Segurament, la gent podia percebre què passava quan l'aire bufava entremig de les cordes d'una arpa fent-les vibrar: es produïa un so. Avui en dia, es ben conegut que els vòrtex poden sorgir de qualsevol estructura la qual tinguin una cua o una superfície que hi transcorri un fluid. Un gran exemple d'aquest succés és el famós pont de Tacoma Narrows el qual es va ensorrar degut a no haver considerat les conseqüències d'aquest fenomen. És a partir d'aquest moment quan es va començar a estudiar a fons el fenomen de despreniment de vòrtex. Les estructures, com ja s'ha vist, poden ser molt variades de mida i de forma, però el present estudi es centra en el despreniment de vòrtex en àleps de màquines hidràuliques.

El comportament dels perfils hidrodinàmics de les màquines hidràuliques té un gran interès tècnicament i científicament. La força que produeix l'aigua en passar al llarg del perfil es pot transformar en una vibració tan forta que pot col·lapsar l'estructura fins a la ruptura. Aquest no és el cas del truncament del perfil Donaldson el qual redueix la vibració ja que, segons estudis experimentals, dissipa molt bé l'energia en els vòrtex, fent que l'àlep vibri a una freqüència molt baixa. No és fins ara que s'ha estudiat el comportament físic de l'àlep.

L'escola politècnica de Laussane (EPFL) i la Universitat politècnica de Catalunya (UPC), concretament el grup de recerca CDIF, han estat treballant conjuntament per poder estudiar aquest truncament tan peculiar, el perfil Donaldson. L'objectiu era entendre quin és el motiu pel qual aquest perfil té bones propietats envers a l'acoblament de freqüències. L'escola politècnica de Lausanne es va encarregar

de realitzar la part experimental del projecte mentre que el grup de recerca CDIF havia de trobar el model de turbulència que descrivís el comportament de l'àlep. Per aquesta part es va utilitzar el programa de simulació ANSYS per observar quin era el comportament del fluid al llarg de l'àlep i al deixant. Es va simular el seu comportament gràcies a diferents models de turbulència. Un cop es van tenir els resultats, es van comparar amb els experimentals però no s'ajustaven tal i com s'esperava, donant un error relatiu de 34,78%. És en aquest punt quan es va plantejar realitzar un projecte de calibratge d'un model de turbulència per trobar el més adient pel cas d'estudi. També, un dels grans precedents va ser l'estudi de calibratge del model k- $\omega$  SST [1] el qual modificant un dels paràmetres,  $\beta^*$ , es van obtenir bons resultats en la simulació d'un aerogenerador de petita escala.

El present projecte neix de la necessitat de trobar un calibratge adequat del mètode de turbulència SAS que simuli el comportament del perfil Donaldson. El model SAS es considera prou potent i acurat com per poder arribar a adequar-se al perfil hidrodinàmic però, com ja s'ha vist en altres simulacions, s'ha de calibrar per poder obtenir uns resultats acceptables.

Per aconseguir realitzar un bon calibratge i valoració dels resultats, cal entendre els fenòmens que transcorren al llarg del perfil hidrodinàmic. En els següents subapartats s'expliquen fenòmens i comportaments del fluid com el desprendiment de vòrtex, la ressonància, etc.

#### *1.1.1. Estudi de la capa límit*

Prandtl va analitzar el flux de fluids amb viscositat petita i alts números de Reynolds, en dues regions ben diferenciades: una sense efectes viscosos o de conducció on el fluid es pot considerar ideal i un altre adjacent a les superfícies sòlides on els efectes viscosos són importants, també anomenat capa límit. Aquest fet és degut a que el gradient de velocitat en la direcció normal a la superfície són molt elevats.

La capa límit és un element fonamental per entendre el comportament d'un fluid al llarg del perfil hidrodinàmic i també permet predir com serà el desprendiment en el deixant del perfil.

La capa límit es situa a les proximitats de la paret del perfil ja que és una part del flux que es veu influenciada per la presència de la superfície. L'espessor compren la regió delimitada per la superfície sòlida i el punt en què la velocitat arriba el 95% del seu valor màxim. A prop de les parets sòlides els efectes viscosos són sempre importants, independentment de lo petita que sigui la viscositat del fluid, i són els responsables de que es compleixi la condició de velocitat nul·la sobre l'obstacle.

A l'inici, l'espessor de la capa límit és petit, pel que el gradient de velocitat i amb ell l'esforç tallant són molt elevats, fent controlar la tendència a la turbulència que tot flux té. Així, la capa límit és laminar en el seu inici.

Durant el seu recorregut per la superfície de l'àlep, cada vegada hi ha un major número de làmines de fluid frenades per les seves veïnes fent que l'espessor de

la capa límit augmenti en el sentit del fluid. Això fa que les làmines llisquin més entre sí: esforços tallants cada vegada més petits. Aquest fenomen transcórrer fins que l'esforç tallant és tan petit que la tendència a la turbulència ja no es pot controlar. En aquest punt la capa límit ja no és laminar. D'aquesta manera el gradient de velocitats disminueix ja que la diferència de velocitat entre les capes és molt petita.

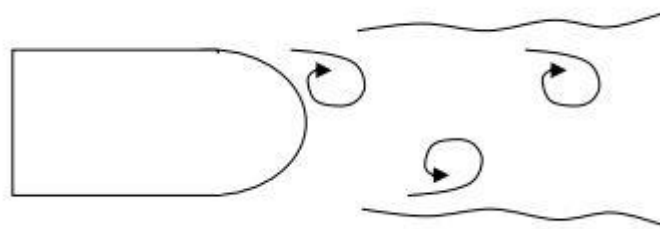
En el present estudi es considera que l'àlep té una rugositat nul·la i que el fluid té viscositat molt petita. Es treballa amb aigua com a fluid de simulació, les seves característiques són incompressibilitat i bidimensionalitat

La viscositat, per tant, contribueix a la resistència en una doble via: directament a través de l'acció dels esforços viscosos (denominada resistència de fricció), i indirectament, modificant el camp de pressions per donar lloc a la resistència de pressió.

### *1.1.2. Desenvolupament de la vorticitat*

Una estela és un flux de turbulència lliure ja que succeeix sense la presència de parets que alenteix el fluid. Dit d'una altra manera, una estela apareix un cop el fluid ha passat la punta de l'àlep i la capa límit es desprèn de la part posterior de l'àlep, Figura 1. Les velocitats a l'estela són inferiors que en la corrent principal ja que es perd quantitat de moviment degut a la força de pressió que es realitza a l'àlep. Aquesta inestabilitat generen fluctuacions de pressió i vibracions estructurals.

Els vòrtex es creen perquè hi ha un obstacle a superar durant el recorregut del fluid i el fluid té una velocitat suficientment gran, valors de Reynolds superiors a 90, o dit d'una altra manera, les forces inercials superen les viscose.

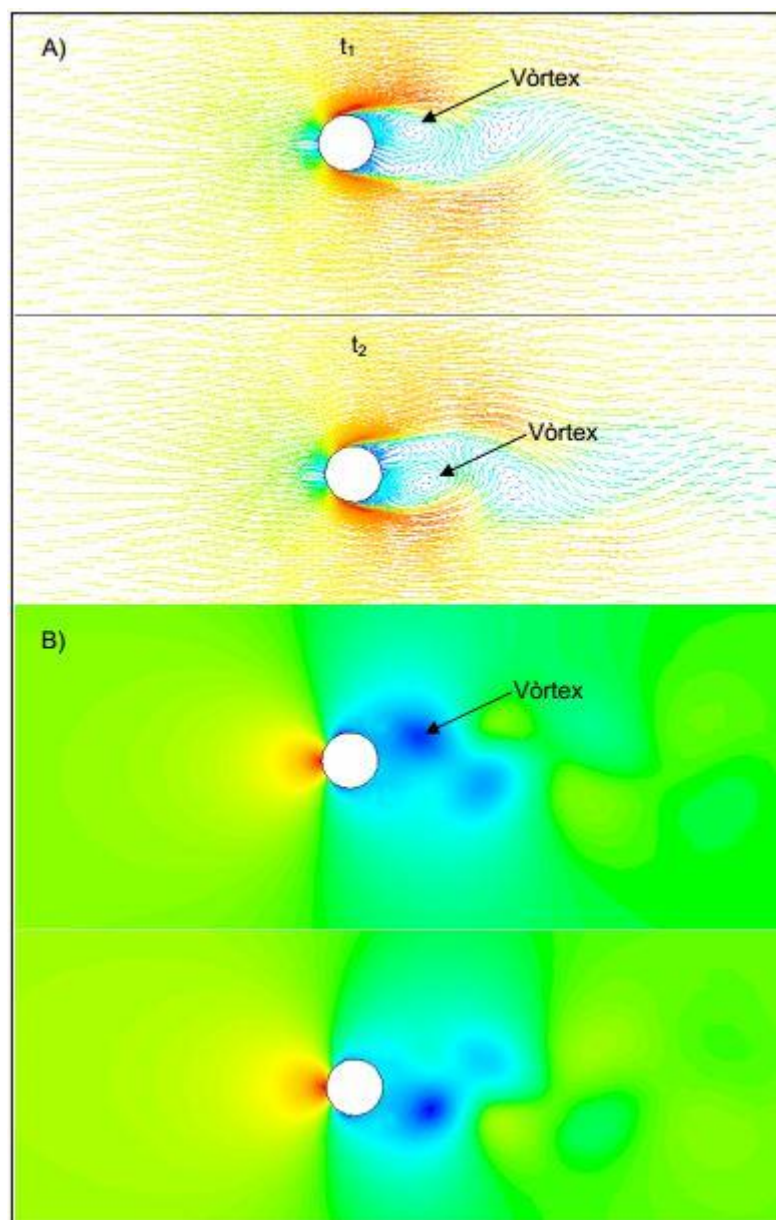


**Figura 1:** Vòrtexs als deixants d'un àlep.

El despreniment de la capa límit produeix variacions de pressió molt elevades a la part de darrere del cos. La zona on anteriorment hi havia el perfil hidrodinàmic es crea una zona de baixa pressió alternativament a banda i banda de la punta de l'àlep, per fluids amb  $Re > 40$ . Com que el flux tendeix anar d'altres a baixes pressions, aquest gradient de pressions es converteix en una zona succionadora que fa moure la punta de l'àlep cap al nucli del vòrtex. S'entén com a vòrtex un flux giratori el qual té un gradient de pressions molt acusat, tenint en el seu nucli

molt baixes pressions. Un vòrtex és un gran mecanisme dissipatiu d'energia cinètica.

A la Figura 2 es pot veure el camp de velocitats i el camp de pressions al voltant d'un cilindre en dos instants diferents de temps. Al primer instant el vòrtex està a la part superior del deixant, es pot observar que la velocitat és més elevada en aquest punt ja que es genera una zona de baixes pressions i el flux es concentra. Seguidament, a la segona imatge, el vòrtex passa a ser a baix del deixant del cilindre, generant una zona de pressions baixes i altes velocitats.



**Figura 2:** Despreniment de vòrtexs al deixant d'un àlep. A) Distribució de velocitats en dos instants de temps  $t_1$  i  $t_2$ . B) Distribució de pressions. **Font:** [2]

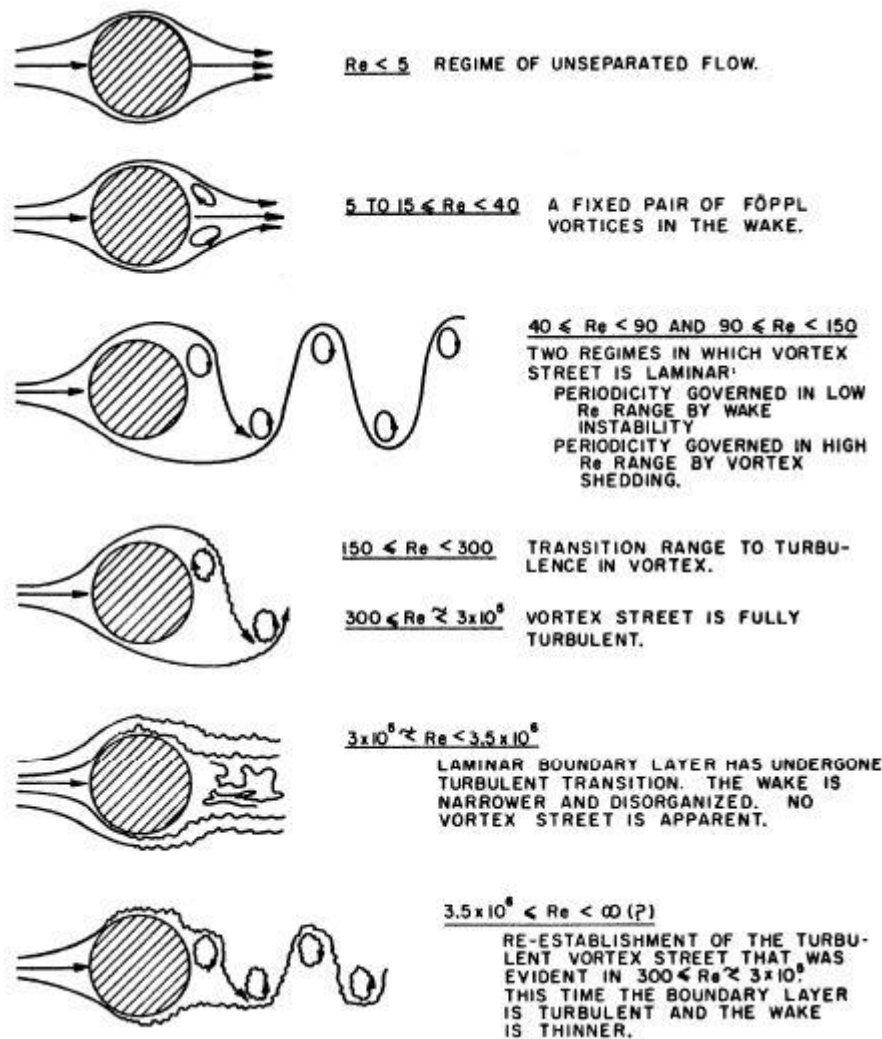
Però no només es creen vòrtex just en començar el deixant sinó que normalment es propaga l'energia d'aquests primers vòrtexs a d'altres més petits. D'aquesta manera es genera el que es coneix com a estela o carrer de Von Kármán. No deixa de ser una zona de pressions inestables. Gràcies a que els fluids solen tenir una viscositat petita, el moviment en els grans vòrtex es fan inestables donant

lloc a un procés de generació de vòrtex més petits. Fins al punt en què la longitud característica del vòrtex és tan petita que les forces viscoses entren en joc i acaben el procés.

Von Kármán va ser un dels primers científics que va estudiar l'estela dels fluids, Figura 4. Ell va postular que es generaven sempre dues files estables de vòrtex iguals i aïllades entre sí, si la disposició de vòrtex és asimètrica i la separació lateral i longitudinal dels vòrtex és igual a 0,28. Al llarg del temps s'ha demostrat que en alguns casos l'estela no segueix aquesta afirmació i que la forma de l'estela està directament relacionada amb el nombre de Reynolds, Equació 1.1.

$$Re = \frac{c_{ref} D}{\nu} \quad (1.1)$$

On la  $c_{ref}$  és la velocitat lliure del fluid, la  $D$  el diàmetre del cos i  $\nu$  és la viscositat cinemàtica. A la Figura 3 es pot veure l'estela que es genera en passar un cilindre per diferents nombres de Reynolds.



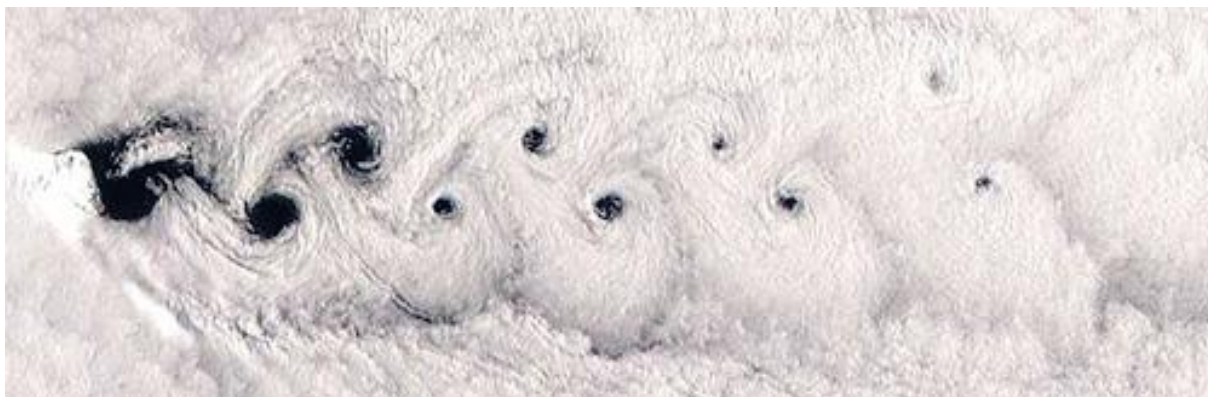
**Figura 3:** Règim d'un fluid en passar a través d'un cilindre circular. **Font:**[3]

A part del nombre de Reynolds, l'estela també depèn del final de l'estructura del cos.



### 1.1.3. Comportament de la vorticitat

La generació de vòrtex a banda i banda del cos i la tendència del cos a apropar-se a les pressions baixes, genera un moviment periòdic del cos. Són vibracions perpendiculars al moviment del fluid fent que la força d'arrossegament i de sustentació siguin no estacionaries. L'amplitud d'aquestes fluctuacions es determina per mitjà de valors eficaços dels coeficients de sustentació i d'arrossegament del cos. També és interessant trobar la freqüència de vibració d'aquestes senyals també anomenades freqüències de Souhal, [4].



**Figura 4:** Remolins o també anomenats estela de Von Kármán de la illa Jan Mayen (Noruega). **Font:** NASA

Cal entendre que aquesta vibració és causada per un factor extern, en aquest cas el fluid, i que en cap cas és intrínsec a cap propietat del cos. Com ja s'ha dit anteriorment, el desprendiment de vòrtex depenen bàsicament de la velocitat del fluid, forma del cos i del nombre de Reynolds del fluid.

### 1.1.4. Freqüència natural

La freqüència natural, o de ressonància, és una característica física pròpia de cada cos. Gairebé tots els objectes o cossos tenen un so característic quan es colpegen, es deixen caure a una superfície o s'alteren. L'exemple més clar és el d'un diapasó, que per la forma que té i el material, quan es colpeja amb una altra superfície se sent un so amb la freqüència exacta d'un La, 440Hz. També, a l'hora de fer caure un llapis, aquest començarà a vibrar fins que quedi quiet, això també es pot anomenar freqüència natural.

Així doncs, tots els objectes tenen una o un rang de freqüències a les quals tendeixen a vibrar.

### 1.1.5. Acoblament de les freqüències

El fenomen de la ressonància és l'acoblament de la freqüència natural i la de la força de vibració externa del cos. Quan aquestes dues forces tenen la mateixa freqüència l'amplitud de les dues ones sinusoidals no es sumen sinó que augmenta progressivament després de cada actuació de les forces, independentment de si les forces externes siguin molt petites. L'acoblament de freqüències pot tenir un efecte destructiu i acabar en ruptura

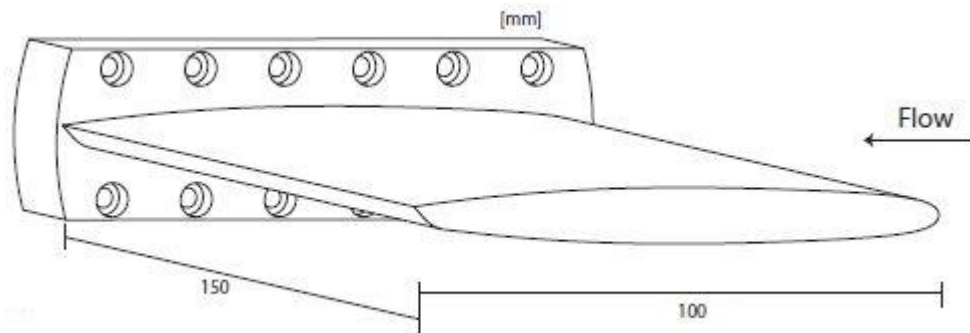


Per tal d'evitar aquesta fatal conseqüència, es poden duu a terme dues accions: una és canviar la cua de l'àlep per tal que el despreniment de vòrtex generi menys vibració o alterar la freqüència natural del material.

Al llarg de la història, davant de casos de fallada de turbines hidràuliques s'ha optat per modificar l'acabament de l'àlep. Alguns exemples són NKula Falls, o a la central hidroelèctrica de Ontario

#### *1.1.6. Àleps utilitzats*

Per el present estudi s'ha utilitzat les característiques de dos perfils d'àlep diferents: NACA 0009 i el perfil Donaldson. El perfil utilitzat en les simulacions es basa en el NACA 0009 però amb la punta modificada. Les dimensions es poden observar a la Figura 5, el material utilitzat ha sigut alumini. La freqüència natural del perfil hidrodinàmic és 890 Hz.

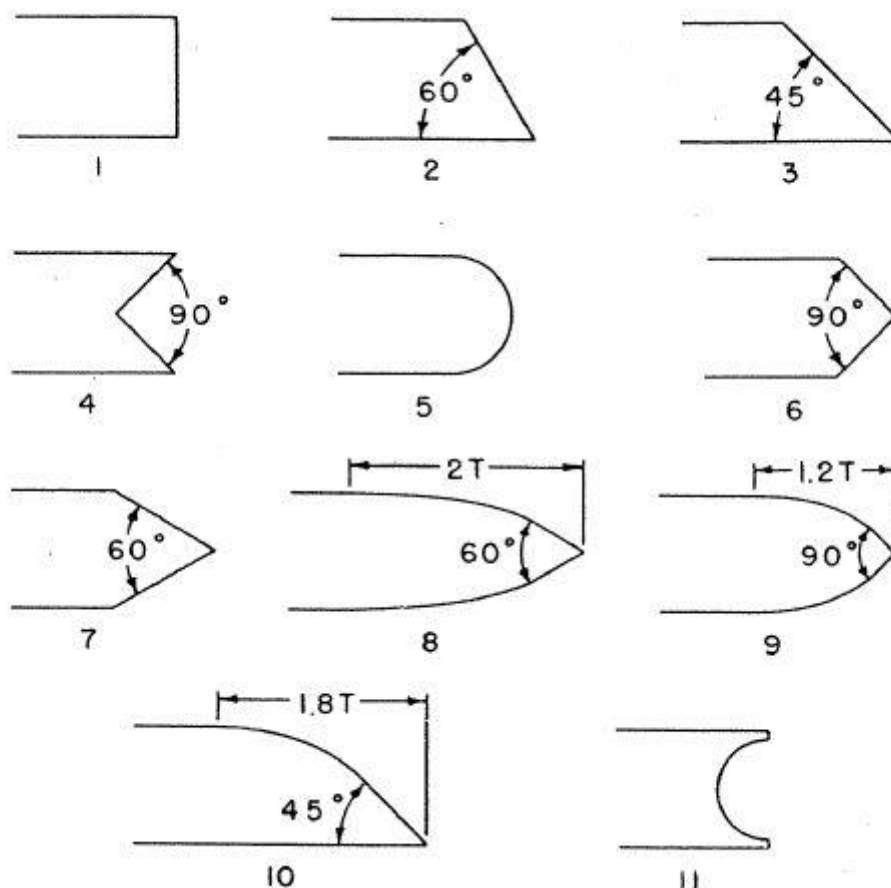


**Figura 5:** Perfil hidrodinàmic NACA 0009 amb truncament Donaldson. **Font:** [5]

La punta de l'àlep està modificada, introduint les característiques del perfil Donaldson. Aquest porta el nom del seu creador, el Sr. Donaldson, el qual el va dissenyar per resoldre la fallada de les seves màquines hidràuliques. L'empresa va contractar el Sr. Donaldson per minimitzar la vibració de les seves màquines i prevenir que els àleps acabessin en ruptura.

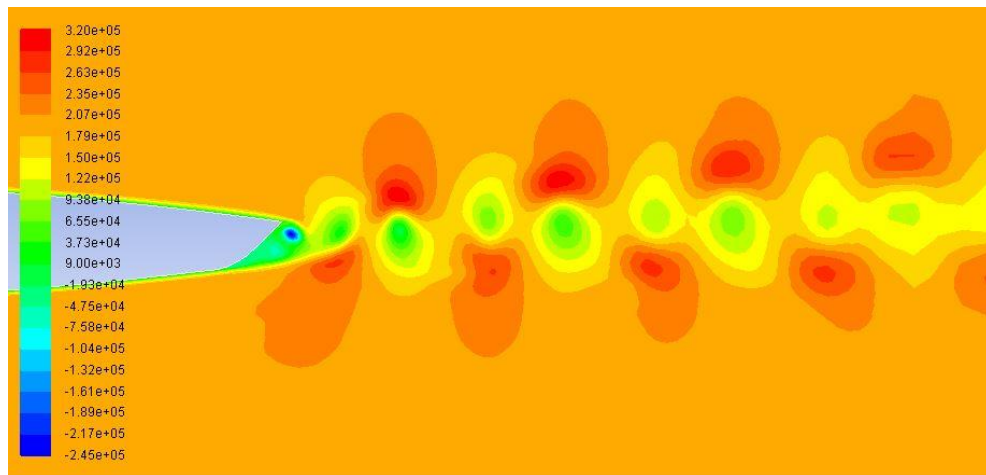
Durant anys Donaldson va mesurar sistemàticament el fluid en una turbina Francis en diferents acabaments d'un àlep hidrodinàmic. Experimentalment, va concloure que per diferents acabaments i segons l'amplitud de la vibració i la velocitat del fluid hi havia 3 truncaments que patien una vibració mínima. Fins ara no s'ha estudiat teòricament quins són els motius pels quals aquests àleps tenen aquest comportament de mínima freqüència.

De totes maneres, pel projecte engegat pel grup CDIF (UPC) i la Universitat Politècnica de Laussane i el present projecte, s'ha estudiat el truncament del perfil número 10 de la Figura 6.



**Figura 6:** Diferents truncaments d'alep fets per Donaldson. **Font:** [5]

Tal i com es veu a la Figura 6, el truncament d'alep número 10 té unes característiques peculiars. Hi ha una superfície de l'alep que segueix una trajectòria aproximadament recta fins a la punta. Mentre que l'altre segueix la forma d'un polinomi de tercer grau i acaba amb un angle de  $45^\circ$ . Aquesta estructura permet a l'alep crear un carrer de Von Kármán: les forces convergeixen en un únic vòrtex inicial que s'origina just en començar el deixant. El costat de dalt del truncament se l'anomena zona de succió ja que el fluid tendeix a desplaçar-se cap a l'espai que queda just a sota de la línia de  $45^\circ$ . La zona de pressió és l'encarregada de donar pressió a la superfície de l'alep i ajudar que aquest giri, el fluid comença a desprendre's de l'alep abans que a la zona de succió generant una zona de baixes pressions, un vòrtex. A la Figura 7 es veu clarament el nucli del primer vòrtex. Després aquest es reformula en altres més petits alternant-se la posició a banda i banda fins a alliberar tota l'energia.



**Figura 7:** Estela del perfil hidrodinàmic.

#### *1.1.7. Dinàmica de fluids computacional*

La dinàmica de fluids computacional (CFD) és una eina que permet visualitzar com un gas o un líquid flueix a partir d'aplicar models matemàtics, mètodes numèrics i algorismes. Aquesta eina és una branca de la mecànica de fluids que aplica fonamentalment les equacions Navies-Stock per estudiar i visualitzar el comportament d'un fluid. CFD permet als científics i enginyers realitzar experiments numèrics, simulacions, sense necessitat de fer ús d'un laboratori clàssic. Els ordinadors permeten resoldre problemes complexos de manera ràpida i més barata que en experiments. També, en cas que s'hagin de realitzar qualsevol modificació en la geometria del model no representen costos addicionals que podrien ser molt elevats per una empresa o institució. En molts casos, s'utilitzen supercomputadors per poder fer les simulacions ja que aquests tenen més velocitat computacional que un ordinador convencional i permeten realitzar els càlculs de manera més ràpida.

A l'inici del segle 20 es va desenvolupar el CFD, inicialment s'utilitzava per analitzar i entendre el comportament de l'aire al voltant de cotxes i àleps d'avió. No va ser fins més endavant, que CFD va ajudar a solucionar problemes de transferència de calor.

Per la realització d'aquest projecte s'ha utilitzat el software ANSYS FLUENT 15.0 que permet simular fluids gràcies a CFD. També, per realitzar les simulacions s'ha utilitzat el clúster de la UPC anomenat Cesca per poder agilitzar el procés.

## 1.2. Objectius

Aquest projecte té un objectiu principal:

- Calibrar el model de turbulència SAS per adequar-se al comportament experimental del perfil hidrodinàmic Donaldson.

D'aquest objectiu general se'n deriven d'altres que, amb la seva consecució individual, s'obtindrà l'objectiu general:

- Determinar quina és la zona de transició laminar-turbulent a la capa límit a partir dels perfils de velocitats.
- Obtenir les freqüències de desprendiment de vòrtex per diferents calibratges.
- Observar quina és l'espessor de la capa límit en el seu transcurs per l'àlep i determinar com efecte en el deixant de l'àlep.

Aquest projecte s'ha fixat els seus límits en trobar un calibratge del model de turbulència SAS que millori la simulació feta anteriorment pel grup CDIF-UPC amb el model SAS.

Per tal d'aconseguir un treball clar i rigorós s'ha treballat personal per poder entendre i utilitzar totes les tècniques i mètodes que requeria la realització del treball. Abans del procés s'ha hagut d'entendre el procediment que utilitzen els models de turbulència per simular, específicament el model SAS. També, conèixer i manejar el programa ANSYS per realitzar les simulacions adequadament. Per la comparació dels resultats, s'han hagut d'entendre mètodes matemàtics complexos.

## 1.3. Abast

La interacció dels fluids amb les estructures és un camp molt interessant pel disseny de màquines hidràuliques. És ben coneguda les fallades de màquines hidràuliques per l'aparició d'altres forces externes, les quals augmenten la vibració de la màquina fins a la ruptura. El present estudi pretén incidir en aquesta problemàtica entenent el comportament d'un àlep hidrodinàmic amb truncament Donaldson que minimitza el desprendiment de vòrtex.

Un calibratge és un estudi constant i metòdic en tant que té un ritme bastant marcat. Es pot dir que el treball ha tingut dues fases de calibratge diferenciades. Inicialment s'ha simulat el perfil hidrodinàmic variant tres valors del mètode SAS. Seguidament s'han tractat les dades per tal de poder obtenir resultats comparables i finalment s'han analitzat i comparat amb les dades experimentals. Després d'aquesta primera fase, s'han seleccionat els paràmetres que donaven més bons resultats per realitzar noves simulacions.

# Capítol 2:

# MARC TEÒRIC

Un flux turbulent presenta una sèrie de característiques complexes, en aquest capítol es pretén entendre la teoria que envolta els fluids turbulents. També, s'especificarà quins són els diferents mètodes desenvolupats fins ara per entendre els fluids turbulents i quin s'ha utilitzat en el calibratge.

Abans d'entrar en la parametrització dels fluids turbulents cal entendre les seves característiques:

- Moviment irregular i caòtic constituït per remolins de diferents mides pels quals es transmet l'energia a escales més petites. Degut als esforços viscosos, a les escales petites es dissipa energia tèrmica, provocant un augment de temperatura. Els remolis, encara que sembli un fenomen aleatori i imprevisible, segueix un comportament pautat és per això que s'utilitzen mètodes estadístics pel seu estudi.
- Augmentar la difusivitat, el qual és causa de l'augment de l'intercanvi de quantitat de moviment. Les característiques que se'n veuen directament afectades per la difusivitat són transport de la massa, quantitat de moviment i energia. Aquesta característica redueix o enredereix la separació de la capa límit.
- Moviment dissipatiu, la turbulència tendeix a mantenir-se. L'energia que utilitza per continuar la turbulència s'extreu del flux principal i l'inverteix en augmentar l'energia interna mitjançant processos de deformació de les partícules fluides. A la turbulència és necessari transferència d'energia per tal de poder compensar les pèrdues viscoses.

Així doncs, es pot parlar de dues escales del moviment turbulent: les grans escales o les petites.

- Grans escales: són aquelles que extreuen l'energia del flux principal i a través del moviment en cascada transfereixen l'energia cinètica a escales més petites. Aquestes escales són de l'ordre de la geometria del fluid.
- Petites escales: en elles té lloc la dissipació de l'energia cinètica i tèrmica.

## 2.1. Equacions fonamentals

Per tal de poder determinar el comportament d'un fluid turbulent és necessari conèixer les equacions de conservació de la massa i la de quantitat de moviment les quals són fonamentals i es presenten intrínseques en qualsevol altra equació. A partir de la teoria de Reynolds, la qual no definia la turbulència d'un fluid, es van sorgir les equacions de Navier-Stokes, que resolien la problemàtica.

### 2.1.1. Equació de conservació de la massa

L'equació de la conservació de la massa o de continuïtat és un pilar fonamental en la mecànica de fluids. Tal i com es veu a continuació, aquesta s'escriu de la forma diferencial i en coordenades cartesianes:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{u}) = S_m \quad (2.2)$$

L'equació és vàlida per a fluids compressibles i incompressibles on el terme  $S_m$  és la porció de massa fluida que s'afegeix al sistema. En el present estudi es treballa amb aigua, un fluid incompressible, i amb condicions ideals on la massa del fluid no es perd. Així doncs, sabent que no hi ha guany o pèrdua de fluid i la pressió al llarg del temps no varia, l'equació (2.1) es pot reduir a:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

El calibratge es realitza únicament en dos dimensions així que en l'equació (2.2) es pot ometre la component  $z$ . L'equació que han de complir tots els punts del volum estudiat és la següent:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.4)$$

### 2.1.2. Equacions de la quantitat de moviment

Les equacions de la quantitat de moviment en dos dimensions es recullen a l'equació 2.4.

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial x} + \rho g_x + F_b \quad (2.5)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau}{\partial y} + \rho g_y + F_b$$

On  $p$  és la pressió estàtica,  $\tau$  és tensor d'esforç,  $\rho g$  descriu la força gravitacional mentre que  $F_b$  són les forces externes. El tensor d'esforç es pot definir com:

$$\tau = \mu \left[ (\nabla u + \nabla u^t) - \frac{2}{3} \nabla \cdot u I \right] \quad (2.6)$$

On  $\mu$  és la viscositat molecular,  $I$  és el tensor unitari i el segon terme de la part dreta és l'efecte de la dilatació.

## 2.2. Models de turbulència

Les equacions de Navier-Stokes (N-S) són quasi impossibles de resoldre analíticament per fluids amb alt número de Reynolds i amb geometries complexes. Així doncs, s'utilitzen l'anàlisi numèric per poder obtenir una solució aproximada de les equacions, el FCD. Per altra banda, les equacions de Navier-Stokes, igual que la teoria de Reynolds, no defineixen bé l'acabament del fluid a la superfície. És per aquest motiu que es van desenvolupar els models de turbulència, que pretenen obtenir resultats bàsics i de caràcter universal al tancament de les equacions de Reynolds.

El motiu principal de l'existència dels models de turbulència recau en la impossibilitat de tenir computadors prou potents per poder resoldre les N-S. Per tant, s'han buscat noves metodologies en què s'utilitzin vies i equacions alternatives sense disminuir la precisió del fenomen a simular. Hi ha tres possibilitats per solucionar les equacions de N-S i d'aquestes tres possibilitats en sorgeixen els tres grans grups de models de turbulència: RANS LES i DNS. Seguidament s'expliquen per ordre creixent de cost computacional i precisió de la solució:

- DNS (Direct Numerical Simulation)

Per aquest mètode es resolen les equacions de Navier-Stokes i la de continuïtat per cada punt de l'espai sense simplificacions. DNS és molt fiable per simulacions en mitjanes i petites escales. Per la seva complexitat en els càlculs, el model està limitat a geometries simples. El seu funcionament és fer el càlcul detallat i exhaustiu de les variables fluides turbulentes i obtenir resultats extensos i complets. La DNS és molt costosa computacionalment per tant està limitada per número de Reynolds relativament baixos, 5.000-10.000. Actualment no s'utilitza gaire.

- LES (Large Eddy Simulation)

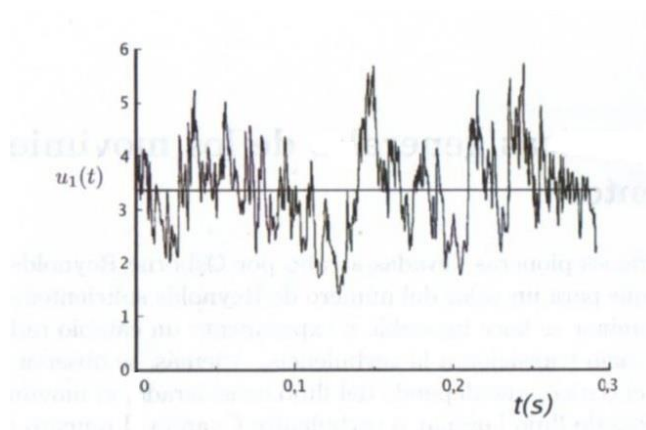
S'anomena també simulació d'escala gran, aquest procediment consisteix analitzar tots els remolins. Utilitza les equacions de N-S però aplica un filtre espacial a les equacions de manera que, en escales petites, s'obté un resultat mig, anomenat tensor d'esforç. Per escales grans no és recomanable ja que són escales molt energètiques i poc homogènies. LES s'utilitza fluids amb números de Reynolds compresos entre 50.000 i 100.000. Té una gran precisió però el cost computacional segueix sent elevat i les mides de la malla han de ser bastant grans. Tot i haver-hi problemes en l'aplicació del model LES, es té un gran esperança i s'entreveu un gran potencial per aplicacions futures.

Aquest mètode de turbulència va ser utilitzat per l'equip de recerca de la UPC en simular l'àlep Donaldson.

- RANS(Turbulence Models for Reynolds-averaged Navier-Stokes)

El model RANS utilitza les equacions de N-S per obtenir valors mitjos temporals del flux dels efectes de la turbulència. Al llarg del temps han sigut els més utilitzats ja que requereixen recursos no massa tècnics per obtenir bons resultats.

Els fluids turbulents són predibles en termes estadístics. Si en un punt fix del domini fluid es mesuren els valors instantanis de les variables fluides durant un interval de temps suficientment llarg i s'omitjanen els resultats en aquest interval, els valors mitjos locals obtinguts varien en l'espai i al temps de forma molt més suau que els valors instantanis. Aquest comportament es posa de manifest en els oscil·logrames de la Figura 8. Aquests valors són molt més rigorosos i coherents que els valors instantanis. És per aquest motiu que dins d'aquest grup de mètodes numèrics i analítics s'emparen magnituds mitges del flux extretes a partir de les equacions de Navier-Stokes.



**Figura 8:** Evolució temporal de la velocitat en un flux turbulent.

Pel model RANS, la velocitat instantània es pot descomposar en velocitat mitjana i fluctuació d'aquesta, equació 2.7.



$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (2.7)$$

D'on  $\bar{u}_i$  és la velocitat mitjana i  $u'_i$  és la fluctuació de la velocitat en l'instant i. Aquesta descomposició també és aplicable a altres característiques com la pressió. Dit d'una altra manera, l'equació anterior té el terme transitori i el difusiu (específic de turbulència). Aplicant aquest concepte a les equacions Navier Stokes anteriors, el resultat és:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial p}{\partial x_j} \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} + \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u'_i u'_j}) \end{aligned} \quad (2.9)$$

D'aquesta manera es veuen representades els efectes de la turbulència a les equacions de Navier Stokes, aquestes són les equacions de RANS. Falta però per determinar el terme  $(\rho \overline{u'_i u'_j})$ :

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3}(\rho \kappa + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l}) \delta_{ij} \quad (2.10)$$

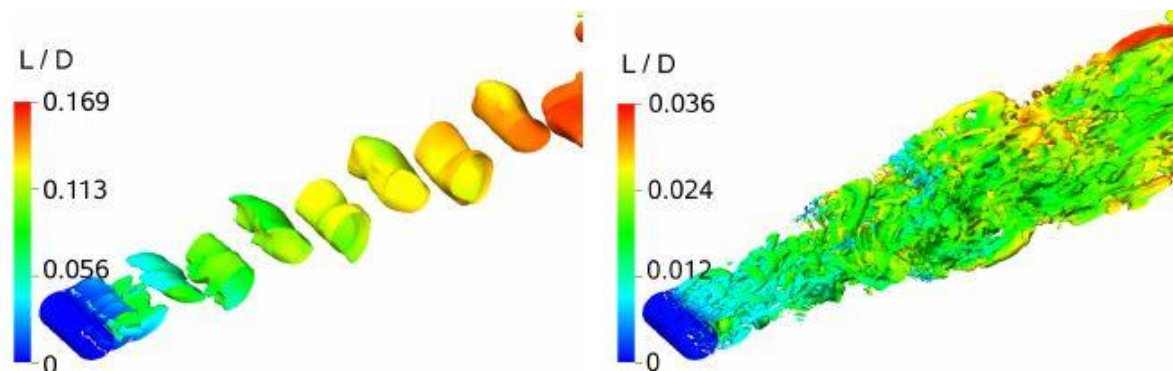
S'han realitzat grans esforços al llarg dels anys per desenvolupar, verificar i validar aquesta metodologia de tractament de les equacions de N-S per múltiples fluxos. En molts casos aquest model s'ha aplicat fins i tot en problemes no estables on hi havia moviment dels cossos o quan el fluid té una gran àrea de separació entre cossos i passa a tenir un comportament inestable. Aquests models se'ls anomena URANS, els quals prediuen acuradament fluxos amb gradients de pressió elevats.

Es va veure que els models RANS/URANS no simulaven bé les esteles i els DES no s'ajustaven correctament al comportament del fluid en contacte amb el cos. Així doncs es va voler dissenyar un nou model híbrid que incorporés el millor dels models RANS/URANS i LES. D'aquesta idea en va sorgir el model DES (Detached Eddy Simulation, 1997), el qual va resoldre problemes complexos sobre aplicacions d'aerodinàmica. DES té un problema greu de dependència de la malla, igual que la té RANS, fet que va incentivar l'estudi de nous models.

Per tant, una alternativa al model DES que supera la dependència del mallat és SAS (Scale Adaptive Simulation), Menter (2003). Seguidament s'exposarà el model en qüestió ja que és el que s'ha calibrat en aquest projecte.

### 2.2.1. Model SAS

SAS és un model híbrid entre RANS i LES que va néixer l'any 2003 gràcies el projecte DESIDER. Dins dels models URANS, SAS és capaç d'ajustar l'escala de longitud turbulenta a les irregularitats del flux local. El model URANS únicament simula les grans inestabilitats, mentre que el model SAS s'ajusta a l'escala i resol de forma dinàmica permetent el desenvolupament d'un espectre turbulent en zones independents, veure Figura 9.



**Figura 9:** Cilindre on es creua flux amb un Reynolds de  $3 \cdot 10^6$ ; esquerra-URANS, dreta-SAS, L-longitud d'escala turbulenta i D-diàmetre del cilindre. **Font:** [6]

A l'equació de l'escala de turbulència s'introdueix la longitud d'escala de Von Kármán. Aquest fet permet que en zones on es desenvolupa l'estela el model redueixi la viscositat turbulenta segons la mida del vòrtex que es mesura gràcies a la longitud d'escala de Von Kármán. Aquest gran descobriment aconsegueix fer entrar les equacions de transport als models de turbulència.

El projecte DESIDER va desenvolupar dos models de SAS: SST-SAS (Menter, Egorov, 2005) i KSKL-SAS (Menter, Egorov, 2005). El present projecte se centrarà en la descripció del model SST-SAS que és el que s'ha utilitzat pel calibratge del perfil Donaldson.

SST-SAS està basat en transformar el model de turbulència SST RANS (1993 Menter) en base a l'aproximació de Rotta. Les equacions de transport de Rotta permeten solucionar les equacions terme per terme i representar grans escales, igual que en el cas de RANS. Les equacions que governen el model SST-SAS únicament difereixen del model SST RANS en la introducció d'un terme a l'equació de transport per la freqüència turbulenta del vòrtex,  $\omega$ , equació (2.11) i equació (2.12).

$$\frac{\partial pk}{\partial t} + \frac{\partial(pu_i k)}{\partial x_i} = G_k - \rho c_\mu k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p\omega}{\partial t} + \frac{\partial(pu_i \omega)}{\partial x_i} \\ = \alpha \frac{\omega}{k} G_k - \rho \beta \omega^2 + Q_{SAS} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + (1 - F_1) \frac{2\rho}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.12)$$

On el terme  $\sigma_{\omega,2}$  és el valor  $\sigma_\omega$  en el model SST.

$$Q_{SAS} = \max \left[ \rho \eta_2 \kappa S^2 \left( \frac{L}{L_{vk}} \right) - C \cdot \frac{2\rho k}{\sigma_\Phi} \max \left( \frac{1}{\omega^2} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \frac{1}{k^2} \frac{\partial k}{\partial x_j} + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right), 0 \right] \quad (2.13)$$

El paràmetre  $Q_{SAS}$  sorgeix de la derivada de segon ordre de l'equació de transport de Rotta. Els paràmetres en aquest terme són:

$$\eta_2 = 3.51; \sigma_\Phi = \frac{2}{3}; C = 2 \quad (2.14)$$

El valor de  $L$  és la longitud d'escala de la turbulència, equació (2.15).

$$L = \frac{\sqrt{k}}{c_\mu^{\frac{1}{4}} \cdot \omega} \quad (2.15)$$

L'equació (2.16) representa la longitud d'escala de Von Kármán, on la constant de Von Kármán és  $\kappa=0.41$ .  $L_{vK}$  és una generalització tridimensional de les condicions clàssiques de capa límit, equació (2.1).

$$L_{BL}^{vK} = \kappa \frac{\frac{\partial u}{\partial y}}{\frac{\partial^2 u}{\partial^2 y}} \quad (2.16)$$

$$L_{vK} = \kappa \left| \frac{U'}{U''} \right| \quad (2.17)$$

$$U' = S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (2.18)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.19)$$

$$U'' = \sqrt{\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_k^2} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2}} \quad (2.20)$$

El model també proporciona un control directa de l'elevat número d'ona d'amortiment. Es realitza per una restricció menor en el valor  $L_{vK}$  de la següent manera:

$$L_{vK} = \max \left( \kappa \left| \frac{U'}{U''} \right|, Cs \sqrt{\frac{\kappa \eta_2}{\left(\frac{\beta}{c_\mu}\right) - \alpha}} \cdot \Delta \right), \Delta = \Omega_{cv}^{\frac{1}{3}} \quad (2.21)$$

Aquest limitador és proporcional a la mida de cada cel·la del mallat,  $\Delta$ , que està calculat a partir de l'arrel cúbica de la mida del volum de control. L'objectiu d'aquest limitador és controlar l'amortiguament de les fluctuacions turbulentes de la millor manera possible. L'estructura del limitador es deriva d'analitzar l'equilibri de la viscositat del vòrtex en el model SST-TRANS.

Cal recordar doncs, els termes de producció que importants del model TRANS-SST com són el modelat de l'efecte de la difusivitat, modelat de la generació de turbulència i modelat de la dissipació de turbulència. Per el primer cas, la difusivitat es duu a terme per les equacions (2.22).

$$\begin{aligned} \Gamma_k &= \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \\ \Gamma_\omega &= \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \end{aligned} \quad (2.22)$$

El terme de la viscositat turbulent es pot desglossar en:

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (2.23)$$

El modelat de la generació de turbulència va a càrrec de l'Equació 2.24.

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.24)$$

Per avaluar  $G_k$  més consistentment amb l'ajuda de la hipòtesis de Boussinesq:

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (2.25)$$

Finalment la dissipació de turbulència és donada per:

$$Y_k = \rho \beta^* f_{\beta^*} k \omega \quad (2.26)$$

On

$$f_{\beta^*} = \begin{cases} 1, & X_k \leq 0 \\ \frac{1 + 980 X_k^2}{1 + 400 X_k^2}, & X_k > 0 \end{cases} \quad (2.27)$$

On

$$X_k \equiv \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (2.28)$$

I també:

$$\beta^* = \beta_i^* [1 + \xi^* F(M_t)] \quad (2.29)$$

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left( \frac{\frac{4}{15} + \left(\frac{Re_t}{R_\beta}\right)^4}{1 + \left(\frac{Re_t}{R_\beta}\right)^4} \right) \quad (2.30)$$

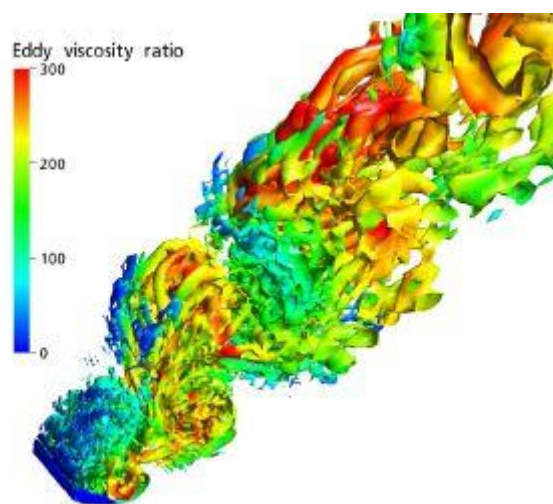
On  $\xi^*=1,5$ ;  $R_\beta=8$ ;  $\beta_\infty^*=0,09$ .

### 2.2.2. Aplicació del model SAS

La simulació descrita en aquest apartat l'ha realitzat el projecte DESIDER amb el model millorat de SST-SAS, [7]. Aquest és diferent a l'utilitzat en el present projecte ja que el model que incorpora el programa ANSYS és SST-SAS (2006) i és anterior al que ha utilitzat el projecte DESIDER.

El model NACA 0021 és un perfil simètric que va ser investigat experimentalment per Swalwell entre altres. En la simulació amb el model SAS-SST el perfil va ser simulat per elevats angles d'atac amb un número de Reynolds de  $2.7 \cdot 10^5$ , es va

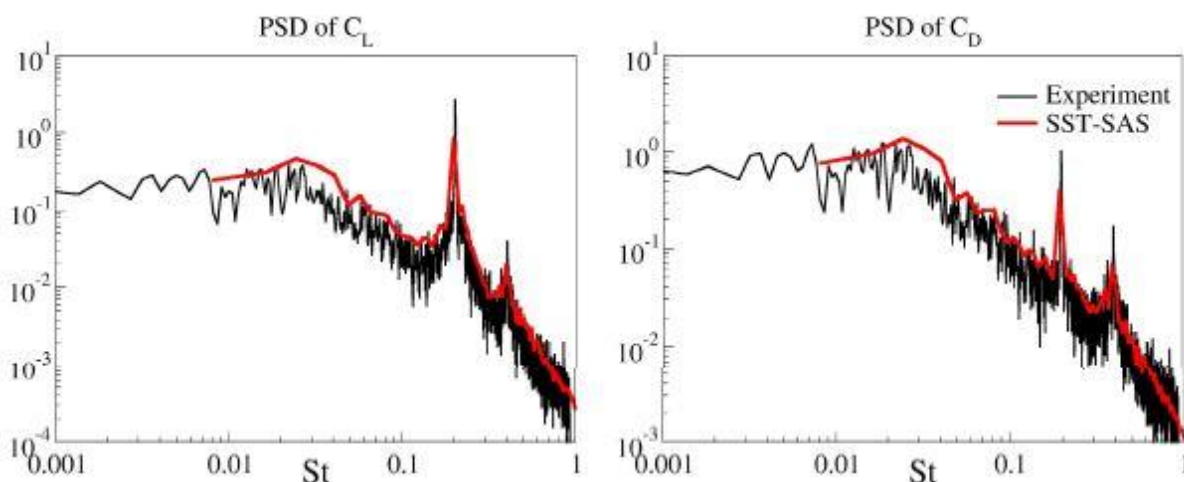
utilitzar una malla hexaedre. En la Figura 10 es pot veure la turbulència darrera de l'àlep. El procediment seguit per fer la simulació va ser deixar un període d'estabilització i seguidament aplicar el mètode en cada cel·la de la malla i obtenir la mitjana de tots els valors obtinguts. Un cop obtinguda la simulació es va comparar els valors de la força d'arrossegament, *drag*, i de sustentació, *lift*, amb els obtinguts experimentalment, Taula 1. La simulació prediu el comportament de l'àlep amb un 2% de precisió comparant-ho amb les dades experimentals.



**Figura 10:** Estructura de la turbulència darrera l'àlep. **Font:** [6]

**Taula 1:** Valors dels coeficients *lift* i *drag* per NACA21 a 60° d'angle d'atac.

	Lift, $C_L$	Drag, $C_D$
SST-SAS	0.915	1.484
Dades experimentals	0.931	1.517



**Figura 11:** Power espectra de l'àlep NACA0021: esquerra- power spectral density del coeficient lift, dreta- power spectral density del coeficient drag. **Font:**[6]

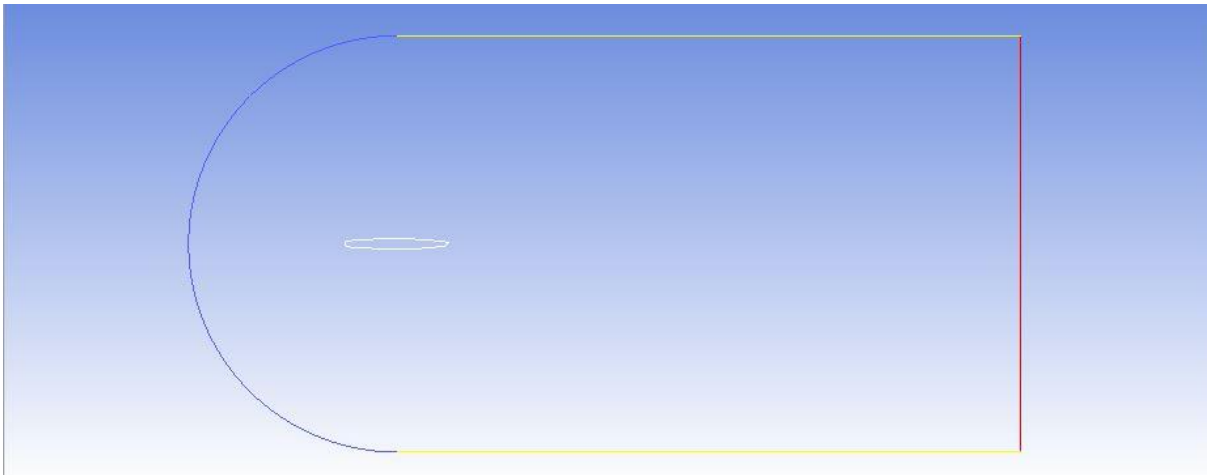
# Capítol 3:

## METODOLOGIA

En el present apartat es detallen quins han estat els passos seguits durant el calibratge. És important clarificar i argumentar correctament la metodologia per tal que es pugui repetir l'estudi en futurs projectes. Pel projecte s'ha fet ús de dues eines: software de simulació, ANSYS FLUENT 15.0, i el Scilab per mètodes numèrics. En un cas ha sigut per simular el calibratge i l'altre per poder tractar les dades.

### 3.1. Superfície de control

El volum de control és un espai tancat que té unes dimensions i forma fixes però permet l'entrada i sortida de massa. Les línies de control delimiten l'àrea a on es realitzarà la simulació. Pel present estudi es parlarà de superfície de control ja que el treball és en dos dimensions.



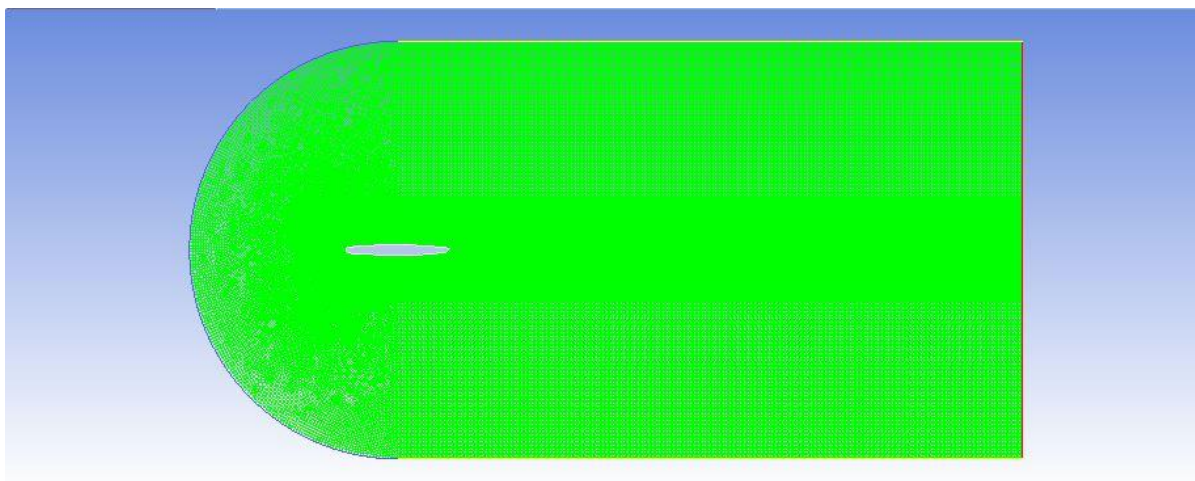
**Figura 12:** Volum de control utilitzat pel calibratge del model.

A la Figura 12 es pot veure que la superfície de control és molt més gran respecte la superfície del perfil de l'àlep. Les seves mides permeten que no hi hagi efectes o interferències de les parets de la superfície al comportament del fluid a la capa límit. La superfície de control és molt més llarga que l'acabament del perfil perquè l'estela no ha d'estar influïda per la pressió final del contorn.

## 3.2. Mallat

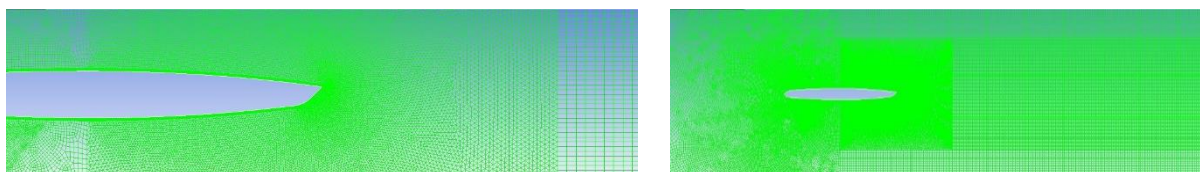
La discretització espacial s'ha dut a terme gràcies a una malla realitzada pel grup CDIF. Aquesta malla s'ha dissenyat tenint en compte les característiques de l'àlep i quins són les àrees més transcendents en l'estudi del comportament del perfil.

És una malla desestructurada on la part més pròxima al perfil és més densa ja que és la zona on es poden obtenir els resultats més interessants, Figura 13. Els fenòmens que es volen observar són el despreniment de la capa límit i la transició del fluid de laminar a turbulent. Aquest mallat fa que la simulació sigui més acurada en la part de la capa límit. La distància de la primera cel·la al perfil hidrodinàmic és  $y^+ = 1$ . Aquest fet significa que, en haver-hi més cel·les per superfície, la simulació obtindrà més resultats que en altres zones.



**Figura 13:** Visió general de la malla.

També a la zona del deixant s'ha creat un mallat diferent per poder capturar millor quin és el comportament dels vòrtexs a l'estela i el despreniment de la capa límit, Figura 14.



**Figura 14:** Detalls de la malla- a l'esquerra: detall de la zona del perfil;  
a la dreta: canvi de mallat al deixant.

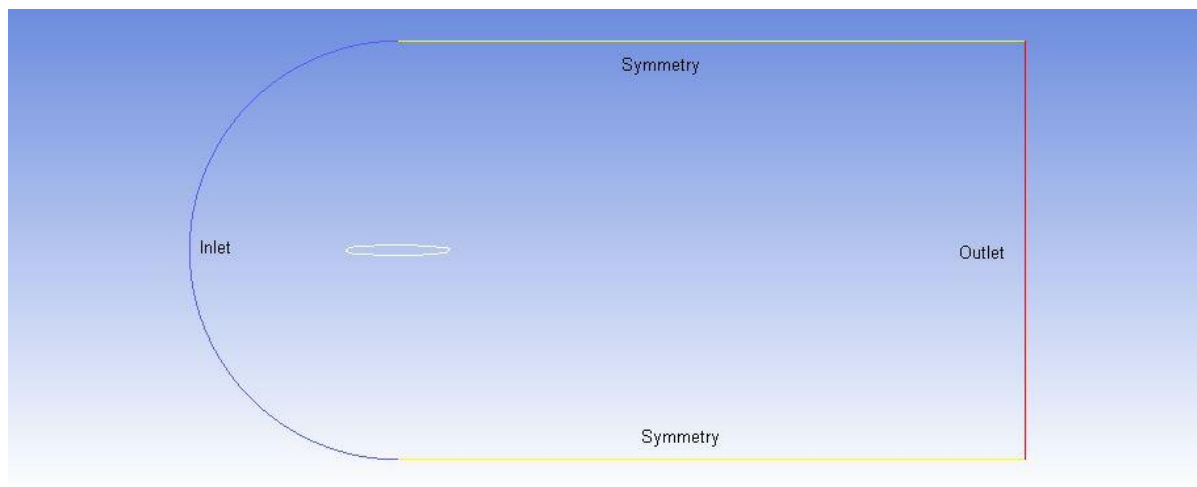


### 3.3. Condicions de contorn

Per tal que la superfície de control realitzi la seva funció correctament i s'ajusti al problema real, s'ha adjudicat una condició específica per cada línia de control. D'aquesta manera la simulació amb CFD tindrà unes condicions iguals a les reals de l'experiment.

A la Figura 15 es pot veure com la superfície de control està creada per quatre línies però dues de les quals tenen la mateixa condició. Tot seguit s'expliquen les condicions:

- Inlet (entrada): és la línia d'on arriba el fluid i l'ha de deixar passar per entrar dins la superfície de control. La velocitat del fluid es defineix dins d'aquesta condició, 20m/s en la direcció horitzontal. També s'especifica la longitud d'escala i la intensitat de la turbulència un 1%. Aquest últim paràmetre determina la proporció de turbulència que té el fluid a l'entrada.
- Symmetry: la condició de simetria és una condició de no transferència de massa entre el flux i la línia de control ni tampoc de transferència. Permet que les diferents capes de fluid no transmetin flux entre sí ni amb la pròpia paret.
- Outlet (sortida): és la superfície de sortida del volum de control. També, s'especifica que les velocitats del flux de les cel·les a prop de l'outlet es vegin afectades per la direcció de la velocitat de les cel·les veïnes. Tenint en compte que hi poden haver vòrtex que quedin tallats per la línia de l'outlet.



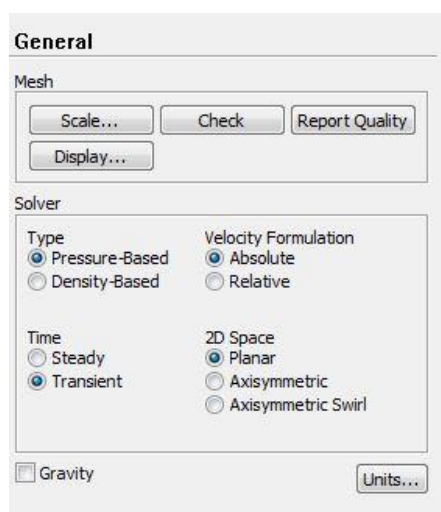
**Figura 15:** Condicions de contorn per cada línia.

També s'ha donat la condició de paret no lliscant al perfil hidrodinàmic. D'aquesta manera es simula la rugositat a la paret de l'àlep.

### 3.4. Condicions de simulació

La simulació té un solver basat en la velocitat de formulació absoluta i la pressió. Aquest últim significa que la densitat és comuna a l'equació d'energia i de quantitat de moviment, sent les dues equacions independents. Les simulacions

estan calculades en règim transitori i amb dues dimensions. A la Figura 16 es pot veure els paràmetres definits en el solver.



**Figura 16:** Paràmetres definits en el solver del programa.

La simulació és en estat transitori la qual té discretització espacial i temporal.

- Discretització espacial: consisteix en transformar el domini continu del flux en una malla de nodes. Aquests nodes es troben centrats a cada cel·la de la malla. Per aquest estudi la discretització es dona a terme per mitjà de volums finits on per cada cel·la de la malla s'integren les equacions diferencials del model, conservació de la massa, quantitat de moviment i energia, i s'obtenen els resultats pertinents. Com més fina és la malla de simulació més precisos són els resultats.
- Discretització temporal: és necessària quan els resultats són dependents temporalment i ja tenen una discretització espacial. Es defineixen uns intervals de temps discretitzats anomenats *time steps*. El valor de cada *time step* és de  $1 \cdot 10^{-5}$  s. Per cada simulació primer es realitzen 10.000 *time steps* per establir el cas d'estudi i després 50.000 *time steps* per obtenir els resultats.

S'ha imposat que la discretització sigui de segon ordre per tal de poder tenir menys error amb discretitzacions no massa petites. L'error que s'obté en discretitzacions de segon ordre és la resta dels quadrats de dos valors, el quadrat d'un nombre més baix que zero és sempre més petit que el propi valor. Així doncs, l'error o tolerància és molt petita.

Per aquesta simulació s'ha utilitzat un mètode algorítmic SIMPLE pel tractament de la relació velocitat-pressió de les equacions de Navier Stokes. Aquest mètode iteratiu resol els gradients de pressió i velocitat fent servir una funció distribuïda de la cel·la anterior o una aproximació, també resol l'equació de quantitat de moviment i obté una aproximació del camp de velocitat. Seguidament es resol l'equació de la pressió per obtenir la nova pressió distribuïda. Finalment les velocitats es corregeixen.

El material utilitzat com a fluid de simulació és l'aigua líquida, veure les característiques a la Taula 2.

**Taula 2:** Propietats de l'aigua utilitzades en el present projecte.

	$H_2O$
Densitat ( $\text{kg/m}^3$ )	998,2
Viscositat ( $\text{kg/ms}$ )	0,001003

S'han determinat els valors de referència segons el fluid, Taula 3. Aquests permeten establir les quantitats de referència utilitzades per calcular les variables de camp de flux normalitzades.

**Taula 3:** Valors de referència per les simulacions.

	Valors de referència
Àrea ( $\text{m}^2$ )	1
Densitat ( $\text{kg/m}^3$ )	998,2
Profunditat (m)	1
Llargada (m)	0,1
Pressió (Pa)	0
Temperatura (K)	288,16
Velocitat (m/s)	20
Viscositat ( $\text{kg/ms}$ )	0,001003
Rati de calor específic	1,4

Per l'avaluació dels resultats es disposa de valors experimentals obtinguts en el treball experimental que va realitzar la Universitat de Lausanne [8]. Pel projecte present s'ha fet ús de les dades de velocitat mitjana en la direcció x i y en certes línies. Aquestes corresponen a  $x/L=0,2$ ,  $x/L=0,4$ ,  $x/L=0,5$ ,  $x/L=0,6$ ,  $x/L=0,7$ ,  $x/L=0,8$ ,  $x/L=0,9$ ,  $x/L=1,03$ ,  $x/L=1,06$ ,  $x/L=1,15$  considerant l'origen de coordenades a 0.05mm des de la punta del perfil i la longitud del perfil igual a 100mm, L. També es disposa del valor experimental de la freqüència de vibració del perfil.

Les velocitats mitjanes de les simulacions s'han recollit perquè s'han creat línies en la mateixa posició al llarg del perfil hidrodinàmic i en el deixant. A la Figura 17 es pot veure les línies creades sobre el perfil hidrodinàmic. Per tal de poder acumular les mitjanes de les velocitats s'ha activat el dispositiu *data sampling*, que realitza una captura estadística de dades.

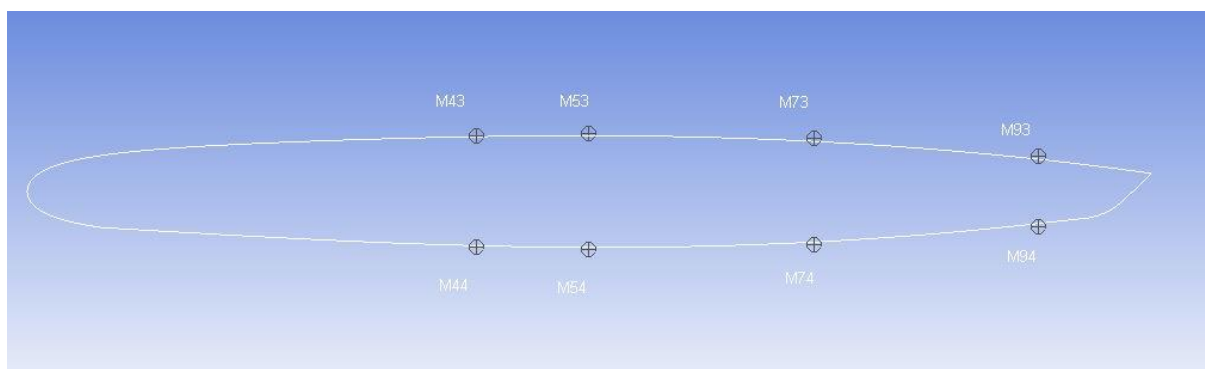
També, cal obtenir la freqüència de desprendiment de vòrtex per comparar amb els resultat experimental. Hi ha dos mecanismes per aconseguir-la o bé per la

variació força *lift* o mitjançant els canvis en el caudal volumètric en el deixant. La variació del caudal volumètric en el deixat plasma quina és el moviment de l'estela, i aquesta està relacionada directament amb la vibració de l'àlep. Així doncs, s'han generat fitxers per cada simulació en els quals es recullen la força *lift*, sustentació, i de drag, d'arrossegament. També, la línia  $x/L=1,15$  es recull la integral superficial de la velocitat. A partir de les funcions s'obteniran les freqüències aplicant la Transformada de Fourier (FFT).



**Figura 17:** Talls en el perfil per l'obtenció de dades.

Adicionalment, s'han creat punts a banda i banda del perfil i dins de la capa límit per poder seguir quin és el comportament del fluid en el transcurs del perfil, Figura 18. Amb els resultats es pot comprovar el fenomen de desprendiment de vòrtex a la capa límit. En cada punt s'emmagatzema les velocitats mitjanes del flux, en x i en y, per poder obtenir la gràfica del *power spectral density* i determinar si en el punt en concret el flux és turbulent o laminar.



**Figura 18:** Punts a la capa límit del perfil per l'obtenció de dades.

En les Taula 4 i Taula 5 es mostra els diferents valors de posició de les línies i punts d'obtenció de dades.

**Taula 4:** Posició de les línies en el perfil hidrodinàmic.

Nom	Punt 1		Punt 2	
	x (m)	y (m)	x (m)	y (m)
$x/L = 0,2$	-0,0300	0,075	-0,030	0,075
$x/L = 0,4$	-0,0100		-0,010	

x/L = 0,5	0,0000		0,000	
x/L = 0,6	0,0100		0,010	
x/L = 0,7	0,0200		0,020	
x/L = 0,8	0,0300		0,030	
x/L = 0,9	0,0400		0,040	
x/L = 1,03	0,0503		0,050	
x/L = 1,06	0,0506		0,051	
x/L = 1,15	0,0650		0,065	

**Taula 5:** Posició dels punts en el perfil hidrodinàmic.

<i>Punts en el perfil</i>			
Nom	x (m)	y (m)	
M43	0,01	0,004945	
M44		0,004945	
M53	0,00	0,005200	
M54		0,005200	
M73	0,02	0,004690	
M74		0,004690	
M93	0,04	0,003103	
M94		0,003103	

Pel tractament de les dades obtingudes a la simulació es fa ús de la transformada de Fourier i el gràfic del *power spectral density*. Aquestes dues eines ens serveixen per veure en gràfics quina és la freqüència predominant en la senyal de *lift* o *drag* i quin és el comportament del fluid: laminar o turbulent.

### 3.5. Paràmetres de la simulació

El programa ANSYS defineix el model de turbulència SAS amb els paràmetres descrits a la Taula 6.

**Taula 6:** Paràmetres del model SAS.

<i>Nom</i>	<i>Valor</i>
Cs	0,11
Alpha* inf	1
Alpha inf	0,52
Beta* inf	0,09
a1	0,31
Beta inner	0,075
Beta outer	0,0828
TKE inner	1,176
TKE outer	1
SDR inner	2
SDR outer	1,168
Production limitar clip factor	10

## 3.6. Mètodes de tractament de dades

La transformada de Fourier descomposa una senyal en les freqüències que la constitueixen formant un espectre de freqüències. La funció, la qual inicialment és temporal, passa a ser de domini freqüencial un cop s'ha passat la transformada de Fourier. L'espectre de freqüències dóna idea de quina és la quantitat de cada freqüència present en la funció original. Les components de freqüència baixa corresponen a contribucions a la funció aproximadament constants, mentre que les de freqüència alta corresponen a parts que varien molt ràpidament. Per obtenir la TTF de cada senyal s'ha passat les dades per un programa del Scilab el qual imprimeix per pantalla la màxima freqüència, gràfica la senyal original i la transformada de Fourier.

Per l'obtenció del *power spectral density* també s'ha utilitzat un programa del Scilab. Aquest indicador ens informa sobre la naturalesa del fluid o bé turbulent o bé laminar. Per definició el PSD descriu la potència contribuïda a la senyal per unitat de freqüència per una freqüència en concret. D'aquesta manera les unitats són W/Hz. Dit d'una altra manera, el PSD descriu com la varianza de la velocitat es distribueix al llarg de la freqüència. Així doncs, el PSD és una funció de distribució acumulativa. Hi ha diferents mètodes per generar una gràfica de PSD, en el present treball s'ha calculat la Transformada de Fourier del quadrat de la fluctuació de la velocitat mitjana. Aquest procediment s'ha realitzat per cada punt d'on obtenim dades.

## **Capítol 4:**

# **RESULTATS I DISCUSIÓ**

En aquest capítol s'explica el procediment seguit a l'hora de calibrar el model SAS i el tractament dels resultats obtinguts. A la part final del capítol s'avaluaran els resultats finals en base a les dades experimental per poder concloure quin ha sigut el millor calibratge del model SAS pel comportament del perfil Donaldson.

El procediment ha tingut varies fases, inicialment s'ha treballat per aconseguir una simulació base no estacionaria i estabilitzada. Després es va modelar incloent les modificacions pertinents segons l'estudi paramètric. Finalment a partir dels resultats obtinguts en cada simulació s'ha realitzat un últim estudi paramètric.

En tots els casos, abans de realitzar la simulació definitiva d'on s'extreuen els resultats, s'ha estabilitzat la simulació. Per comprovar que la simulació està estabilitzada s'observa les senyals de la força d'arrossegament i de sustentació per determinar si la funció és estable. El programa ANSYS FLUENT presenta un error de freqüència de 2Hz per les simulacions de 50.000 *time steps* i de 4Hz per les de 25.000 *time steps*.

### **4.1. Cas base**

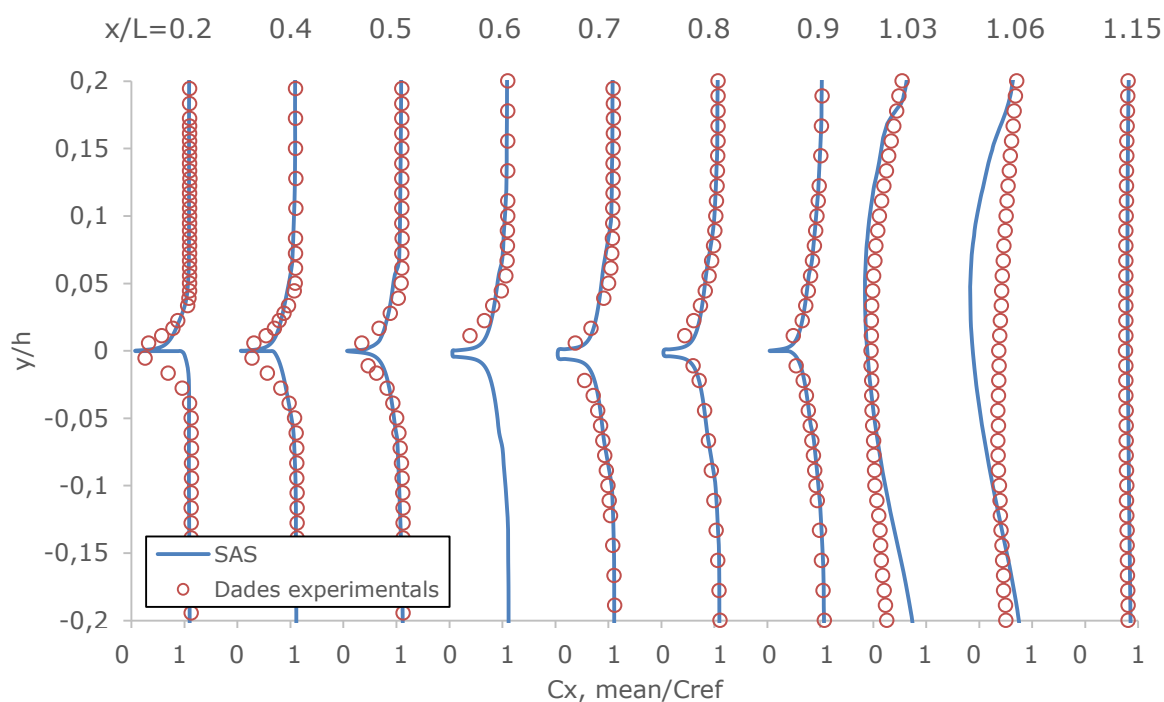
Aquesta simulació base no presenta cap alteració en els paràmetres del model de turbulència i serà a partir del qual s'obtingran els diferents casos d'estudi. A la Taula 7 es poden observar quins són els valors de cada constant, aquestes es modificaran a les següents simulacions.

**Taula 7:** Constants del model SAS que es modificaran pel calibratge.

Constants del model SAS	
$\alpha^*$	1
$\beta^*$	0,09
Cs	0,11

De la simulació s'han extret fitxers de velocitats mitjanes segons la posició a les diferents línies creades al model. Aquests valors s'han tractat per tal de poder obtenir perfils de velocitat. Cal tenir en compte que la posició més a prop de l'àlep en què s'ha extret dades ha sigut de  $1,65 \cdot 10^{-6}$  m respecte el perfil. Aquest valor coincideix en l'aresta de la primera cel·la de la malla al costat de l'àlep.

A la Figura 19 es pot veure el comportament de la velocitat mitjana en la component x del fluid al llarg del recorregut del perfil de l'àlep. A l'eix horitzontal s'ha graficat la velocitat del fluid adimensionalment sent 1 la velocitat màxima, 20m/s. A l'eix vertical s'ha dibuixat la posició dividint el seu valor per 0,009 m que és la llargada de l'àlep. Per la forma del perfil es pot observar la zona de transició de laminar a turbulent. Si el perfil de velocitats és més estilitzat, tenint una obertura a la velocitat màxima abrupta, estem davant d'un fluid turbulent. La zona de transició comença quan aquest colze tan pronunciat es relaxa donant una forma més suau per arribar a la velocitat màxima del fluid, 1. Finalment, es pot denominar un perfil 100% turbulent quan aquest és totalment obert i aixefat. També, pel perfil de velocitats es pot visualitzar la capa límit ja que aquesta acaba quan s'aconsegueix el 95% de la velocitat del fluid.



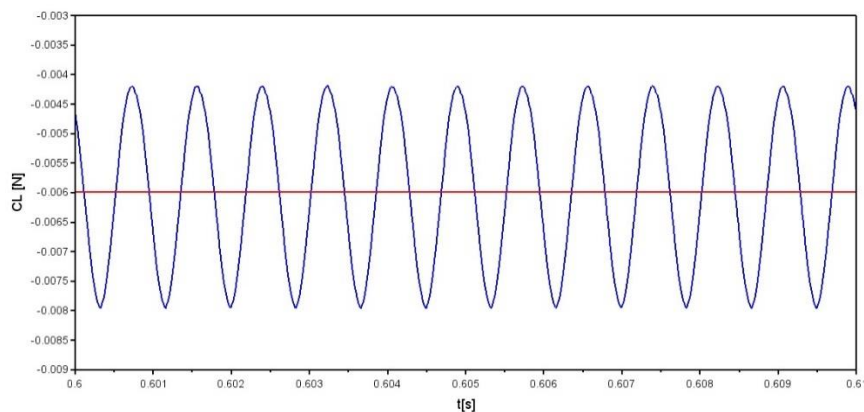


**Figura 19:** Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep pel cas base.

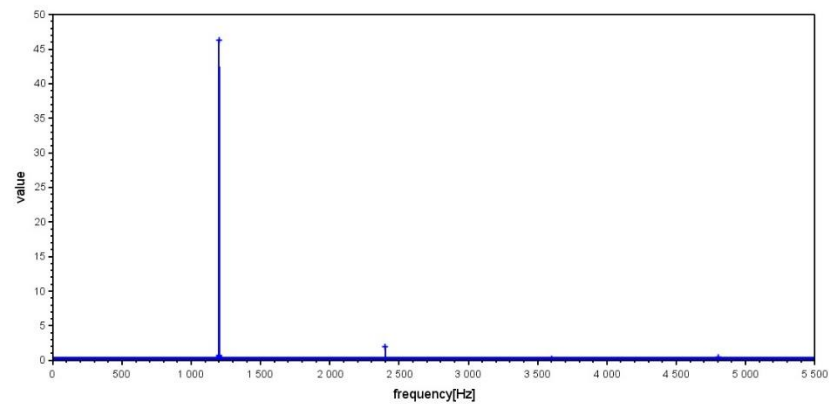
Observant la Figura 19 es pot notar com el comportament del fluid a cada costat del perfil és diferent. A la banda de dalt del truncament Donaldson, zona de succió, la zona de transició apareix després que a la banda de baix, zona de pressió. Pel cas base la zona de transició a la banda alta es troba entre el 50% i el 60% de la longitud de l'àlep mentre que a la banda baixa es troba entre el 40% i el 50%. També el perfil de velocitats revela un espessor de capa límit més gran a la zona de succió que a la zona de pressió.

Comparant els perfils de velocitat resultants amb els extrems de les dades experimentals, la simulació amb SAS s'ajusta més a la banda superior que a l'inferior. A la zona de pressions, les velocitats de les dades simulades normalment s'avancen a les experimentals. Per aquest cas, el model augmenta la velocitat real del fluid i com a conseqüència la turbulència. Així doncs, per algun cas la zona de pressions el fluid té un comportament generatiu d'energia cinètica a causa del sobredimensionament de la velocitat del fluid i el posterior augment de la capa límit a la cua. Com més ampli és l'espessor de capa límit més fort és el desprendiment de vòrtex formant una vibració d'alta amplitud i baixa freqüència. Aquest comportament no interessa que ocorri ja que l'àlep tindrà més tendència a arribar a la ruptura.

La força de sustentació té una amplitud de 0,003789 Newtons, Figura 20. La freqüència de desprendiment de vòrtex de l'àlep és de 1200,02 Hz a partir de la força *lift*, Figura 21, donant un error respecte la freqüència de les dades experimentals del 34,78%. La freqüència extreta de l'integral de superfície és de 1201,02 i l'error relatiu és similar a l'anterior, 34,73%

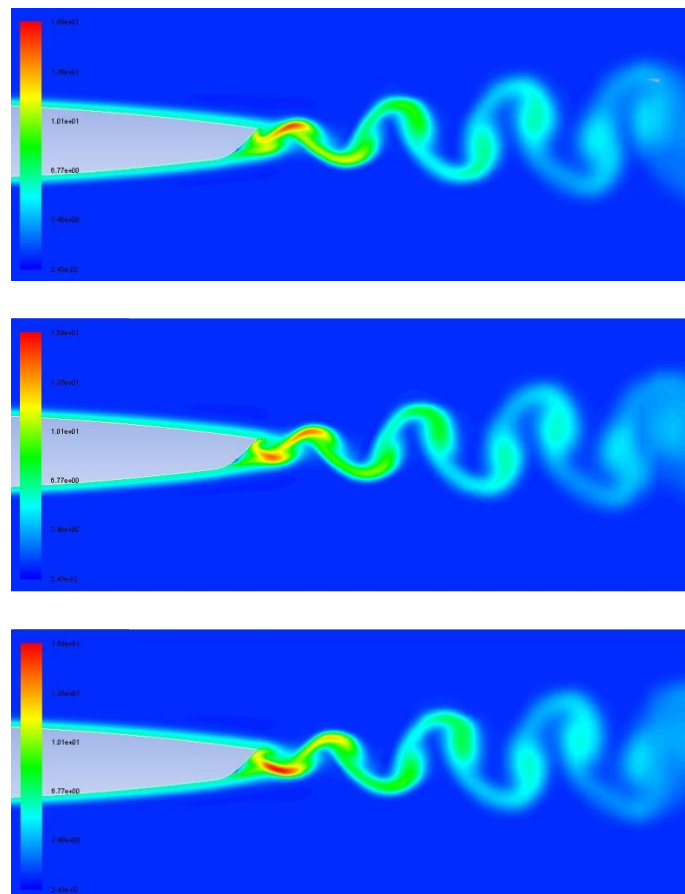


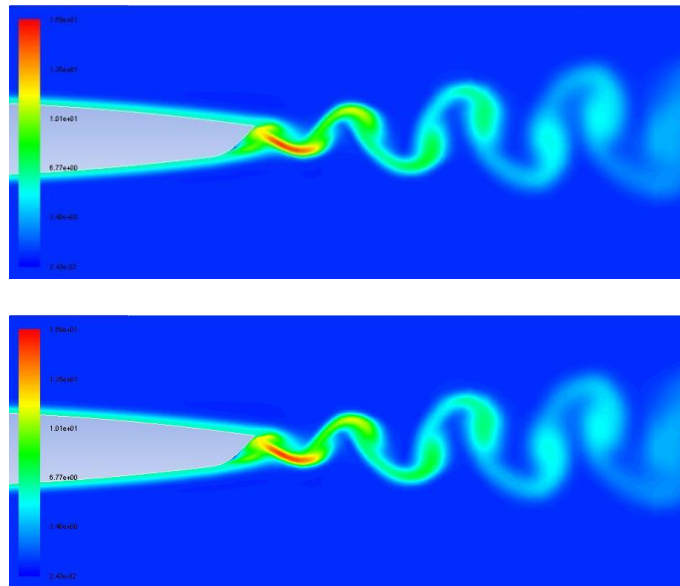
**Figura 20:** Senyal de la força de sustentació, lift, pel cas base.



**Figura 21:** *Freqüència del despreniment de vòrtex de la força de sustentació, lift, pel cas base gràcies a la transformada de Fourier.*

També s'ha observat la intensitat de turbulència al truncament i al deixant de l'àlep per poder apreciar el despreniment de vòrtex, Figura 22. La màxima intensitat de turbulència es concentra en el primer i segon vòrtex els quals tenen més energia turbulenta. A partir d'aquests dos es va dissipant energia fins a esvair-se la turbulència. Per aquest cas la capa límit té un espessor considerable.





**Figura 22:** Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas base.

## 4.2. Estudi paramètric del model de turbulència SAS

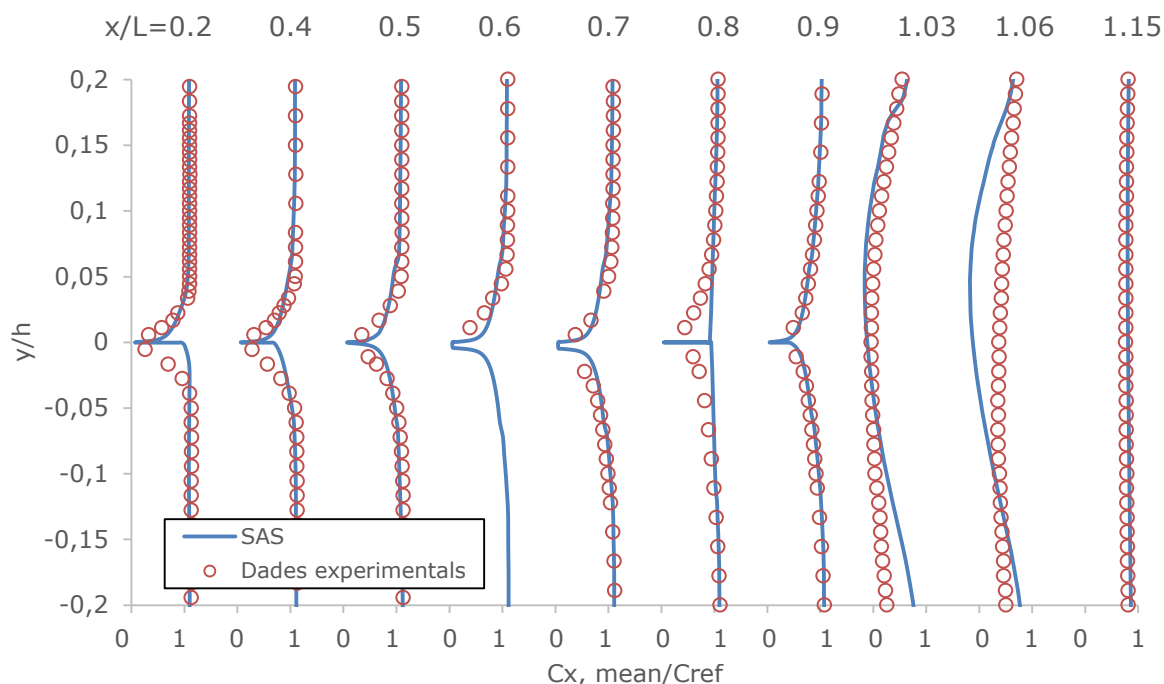
Pel calibratge del model s'ha escollit tres paràmetres constants del model els quals es modificaran i es compararan els resultats de la simulació amb les dades experimentals. Per escollir-los s'ha seguit diferents criteris: en el cas de l'elecció del paràmetre  $\beta^*$  s'ha convingut a seguir les conclusions de l'estudi paramètric del model de turbulència  $k-\omega$  [1]. Els altres paràmetres,  $\alpha^*$  i  $C_s$ , s'han seleccionat perquè es troben presents comunament en el model de turbulència TRANS-SST i el SAS. En tots els casos s'ha modificat cada paràmetre un  $\pm 10\%$ , veure a la Taula 8 els valors de cada constant.

Variant cada paràmetre en un percentatge petit,  $\pm 10\%$ , permetrà descartar ràpidament quins són les simulacions que no presenten un bon calibratge.

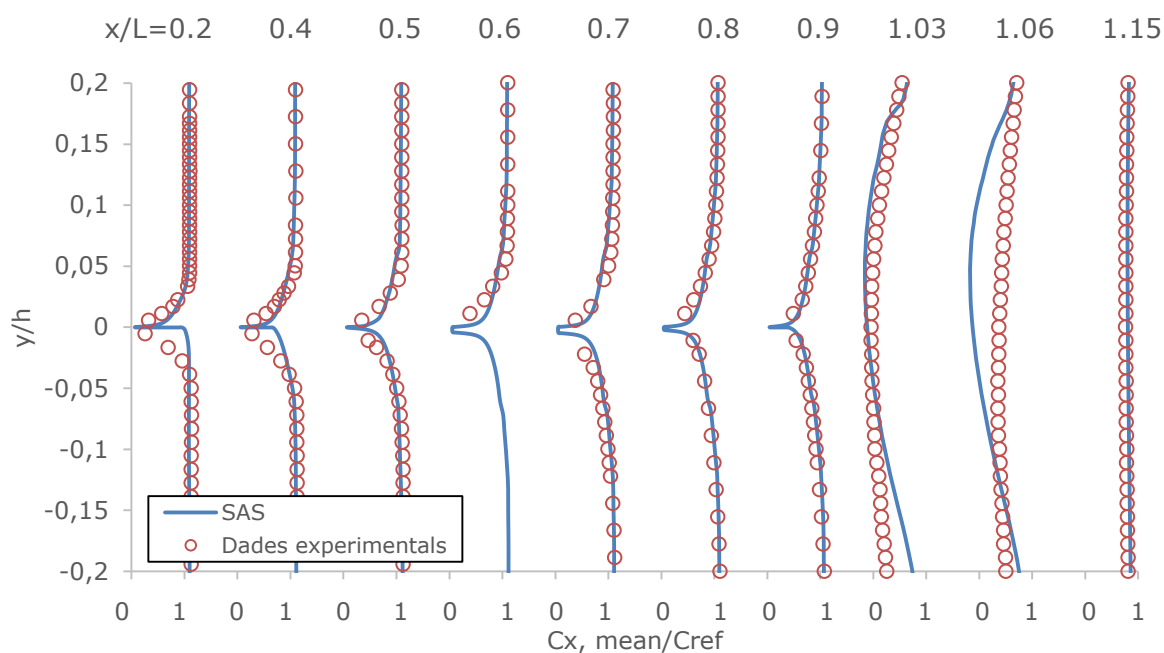
**Taula 8:** Valor de les constants modificades del model SAS per cada estudi paramètric.

<i>Constants modificades per cada simulació</i>	
$\alpha^* - 10\%$	0,9
$\alpha^* + 10\%$	1,1
$\beta^* - 10\%$	0,081
$\beta^* + 10\%$	0,099
$C_s - 10\%$	0,099
$C_s + 10\%$	0,121

En cada simulació s'ha creat documents que registraven els valors de les senyals de *lift* i *drag* en fitxers per tal que aquests puguin ser tractats posteriorment. També, s'han registrat les velocitats mitges per cada línia i així poder obtenir els perfils de velocitats (Figura 23-28).



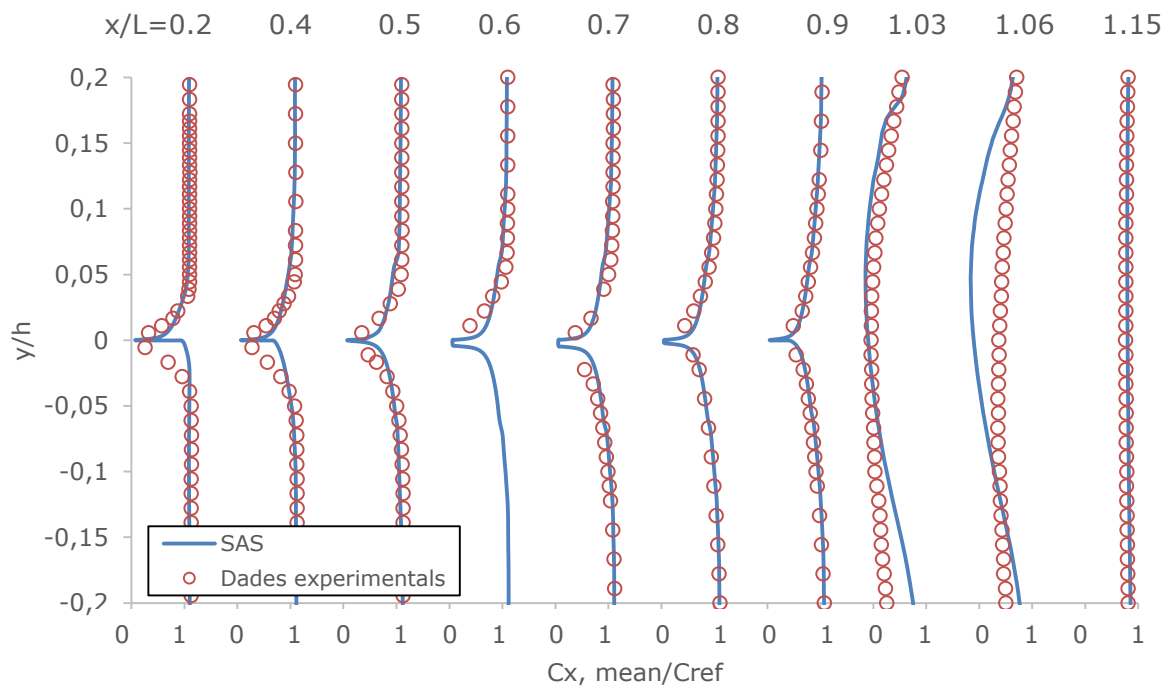
**Figura 23:** Perfil de velocitats mitjanes en la component  $x$  per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un -10% el paràmetre  $\alpha^*$ .



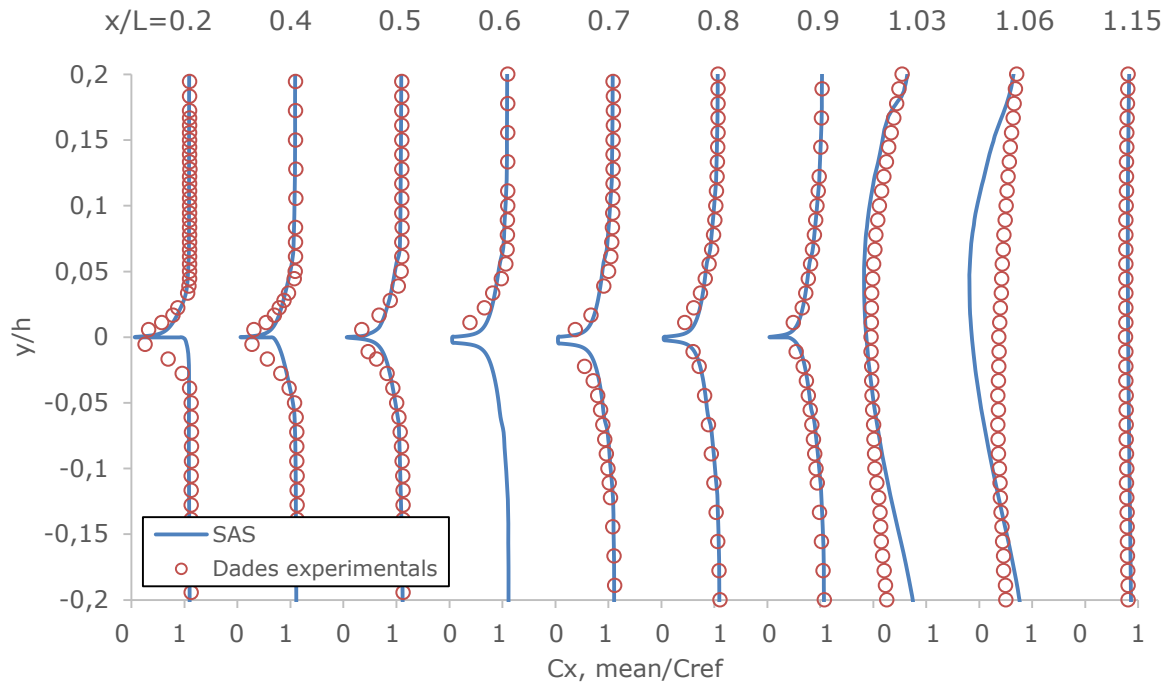
**Figura 24:** Perfil de velocitats mitjanes en la component  $x$  per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un +10% el paràmetre  $\alpha^*$ .

Visualment les gràfiques dels perfils de velocitat mitjana de les Figura 22 i Figura 23 són quasi idèntiques. Tot i això hi ha una petita diferència que pel cas modificat -10% el valor de  $\alpha^*$ , la velocitat és una mica més elevada. El valor de  $\alpha^*$  està relacionat amb l'atenuació de la viscositat turbulenta pel que si es disminueix el valor, l'esmortiment de la viscositat turbulenta serà menor i, per tant, el fluid tindrà més presència de comportaments turbulents.

De totes maneres, pels dos casos la zona de transició transcórrer durant el 50% al 60% de la longitud del fluid a la banda de succió i entre 40% i 50% a la banda de pressió. A la línia 0.9, quan la capa límit està apunt de desprendre's, es pot observar que la capa límit té un espessor molt gran per totes dues bandes del perfil. Aquest fet ens demostra que el desprendiment de vòrtex serà fort produint una vibració de d'amplitud alta i freqüència baixa.



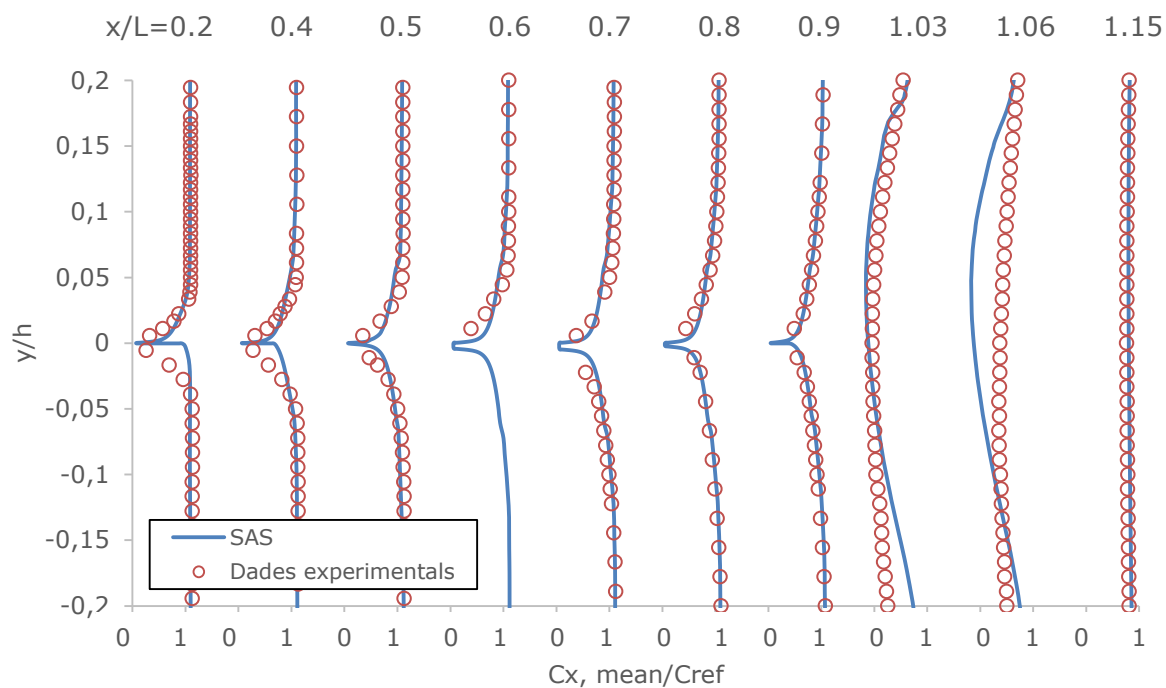
**Figura 25:** Perfil de velocitats mitjanes en la component  $x$  per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un -10% el paràmetre  $\beta^*$ .



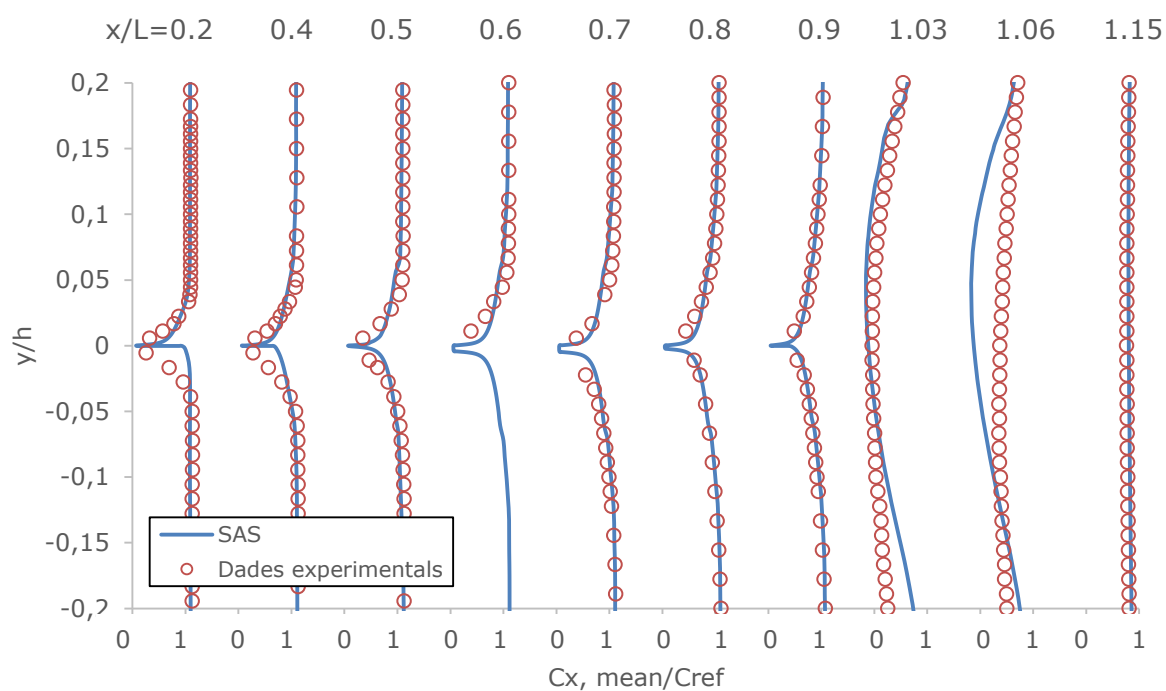
**Figura 26:** Perfil de velocitats mitjanes en la component  $x$  per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un +10% el paràmetre  $\beta^*$ .

Els canvis introduïts en el model de turbulència SAS del paràmetre  $\beta^*$  són pràcticament inexistents a la Figura 25 i Figura 26. Les diferències entre elles són minses, la disminució del paràmetre encarregat de la dissipació d'energia turbulenta no afecta pràcticament la velocitat mitja del fluid. Tampoc ho fa en el cas de la localització de la zona de transició de la capa límit que, igual que en el cas base i als anteriors, es troba entre el 50% i 60% de la longitud del perfil en el cas de la zona de succió i entre el 40% i 50% en el cas de la zona de pressió.

Tot i això, si es comparen aquests dos casos amb els casos on es modificava el paràmetre  $\alpha^*$ , no hi ha presència d'un canvi substancial en el perfil de velocitats.



**Figura 27:** Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un -10% el paràmetre  $C_s$ .



**Figura 28:** Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un -10% el paràmetre  $C_s$ .

Igual que en els casos anterior, la modificació d'aquest nou paràmetre Cs no presenta canvis notables a la gràfica del perfil de velocitats, Figura 27 i Figura 28. Tampoc es pot veure que la localització de la zona de transició variï.

Per altra banda s'han calculat les freqüències de desprendiment de vòrtex a partir de la força *lift* i del caudal volumètric al deixant. A la Taula 9 es presenten els valors obtinguts en cada simulació.

**Taula 9:** Freqüències del desprendiment de vòrtex per diferents simulacions a partir de la força *lift* i del caudal volumètric.

	<i>Freqüència mesurada a la força lift (Hz)</i>	<i>Freqüència mesurada en el caudal volumètric (Hz)</i>
$\alpha^* - 10\%$	1214,02	1217,03
$\alpha^* + 10\%$	1216,02	1215,03
$\beta^* - 10\%$	1220,02	1211,02
$\beta^* + 10\%$	1210,02	1221,02
Cs-10%	1200,02	1202,64
Cs+10%	1201,17	1201,02

### 4.3. Exploració de camins

Un cop s'han tractat i exposat els resultats, s'han analitzat amb l'objectiu d'escollir els millors calibratges i poder realitzar una altra tanda de simulacions. Tal com s'ha vist anteriorment hi ha dos fonts de dades que poden ajudar en el anàlisi: els perfils de velocitats mitjanes i la freqüència de desprendiment de vòrtex.

Els perfils de velocitats no ens donen informació rellevant ja que visualment no hi ha diferències transcendents en el comportament de la velocitat en els diferents calibratges. Així doncs, per aquest anàlisi no es farà ús dels perfils de velocitat.

Pel que fa a la freqüència de desprendiment de vòrtex, s'han calculat els errors relatius respecte la freqüència obtinguda experimentalment, 1840 Hz, Taula 10.



**Taula 10:** Errors relatius de les freqüències del desprendiment de vòrtex per diferents simulacions a partir de la força *lift* i del caudal volumètric respecte la freqüència experimental.

	<i>Errors relatius</i>	
	Freqüència mesurada a la força <i>lift</i>	Freqüència mesurada en el caudal volumètric
$\alpha^* - 10\%$	33,91%	33,86%
$\alpha^* + 10\%$	34,02%	33,97%
$\beta^* - 10\%$	34,24%	34,18%
$\beta^* + 10\%$	33,69%	33,64%
Cs-10%	34,72%	34,64%
Cs+10%	34,78%	34,73%

Un cop s'han obtingut els errors relatius, s'ha pogut valorar quins són les simulacions que més s'adeqüen al comportament del perfil. Observant els valors dels errors relatius, les simulacions corresponents quan el paràmetre  $\alpha^*$  s'incrementa un 10% i el paràmetre  $\beta^*$  es redueix un 10% són els més baixos. Així doncs, es realitza una altra estudi paramètric augmentant o disminuint un 100% 200% i 300% el paràmetre escollit.

## 4.4. Estudi paramètric avançat del model de turbulència SAS

Així doncs, per aquestes sis simulacions les constants que variaran en cada simulació estan exposades en la Taula 11.

**Taula 11:** Constants escollides i modificades de la parametrització.

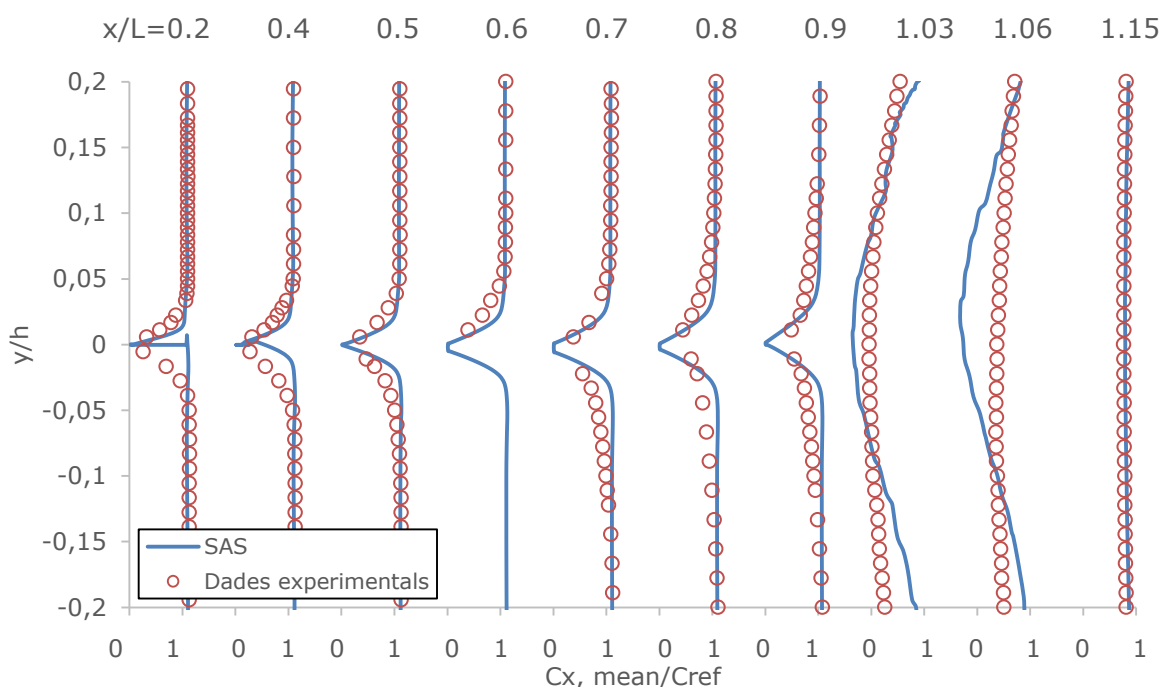
<i>Constants modificades per cada simulació</i>	
$\alpha^* - 100\%$	0
$\alpha^* - 200\%$	-1
$\alpha^* - 300\%$	-2
$\beta^* + 100\%$	0,18
$\beta^* + 200\%$	0,27
$\beta^* + 300\%$	0,36

Per manca de temps, les simulacions  $\beta^* +200\%$ ,  $\beta^* +300\%$  i  $\alpha^* -200\%$  s'han executat 25.000 time steps. Així doncs els resultats presentaran un error diferent a la resta de simulacions.

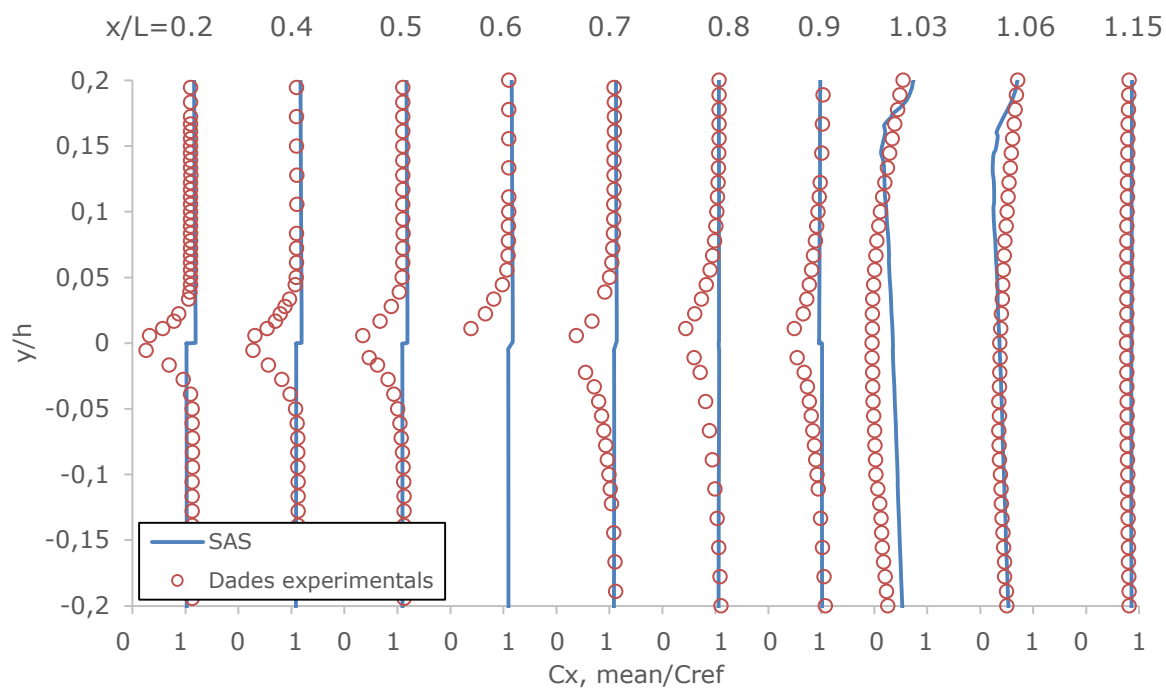
Les dades de les simulacions s'han tractat per poder obtenir els perfils de les velocitats mitjanes i les freqüències de desprendiment de vòrtex. A les Figura 30 i Figura 31 els perfil de velocitats són totalment erronis. Així doncs, quan es disminueix el valor de  $\alpha^*$  fins a valor negatiu, la senyal de la força *lift* és dolenta. També per corroborar aquesta hipòtesis, s'ha comprovat la forma de la senyal de la força *lift* quan  $\alpha^*$  arriba al  $-300\%$  del seu valor inicial, Figura 31. Efectivament el calibratge és dolent per  $\alpha^*$  inferior a 0.

Quan  $\alpha^*$  és igual a 0 el calibratge és millor que en els casos esmentats anteriorment però tot i així tampoc és acceptable. La Figura 29 es mostra el perfil de velocitats mitjanes. A la zona turbulenta el model no s'ajusta al comportament real del fluid, en canvi per la zona laminar la simulació és millor. De totes maneres, únicament observant el perfil de velocitats es pot veure que no és un bon calibratge.

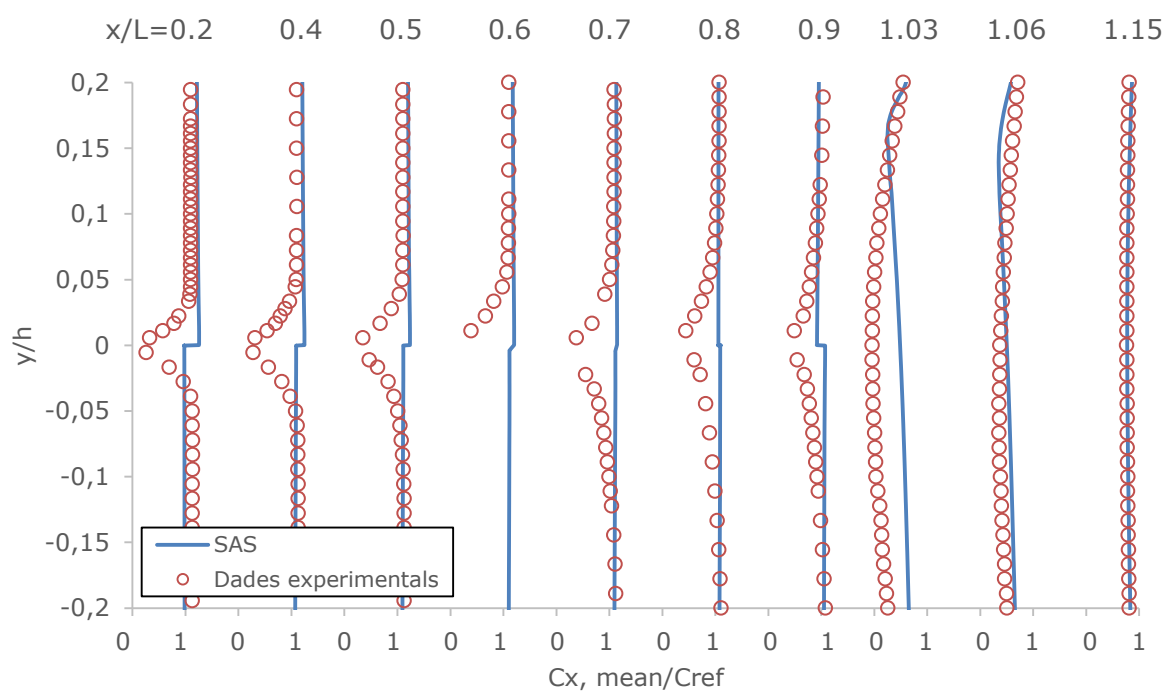
Per aquests tres casos es pot concloure que el paràmetre  $\alpha^*$  no té una bona adequació al perfil hidrodinàmic quan el valor és igual o inferior a 0. Així doncs, quan l'esmortiment de la viscositat turbulenta és nul·la o negativa el model no genera una bona simulació de la zona de turbulències ja que aquest paràmetre és el que permet obtenir la predicció del fluid a l'estela. També, quan aquest valor és negatiu la correcció dels punts on el Reynolds és baix no es corregeixen degudament ja que el paràmetre  $\alpha^*$  també té aquesta funció.



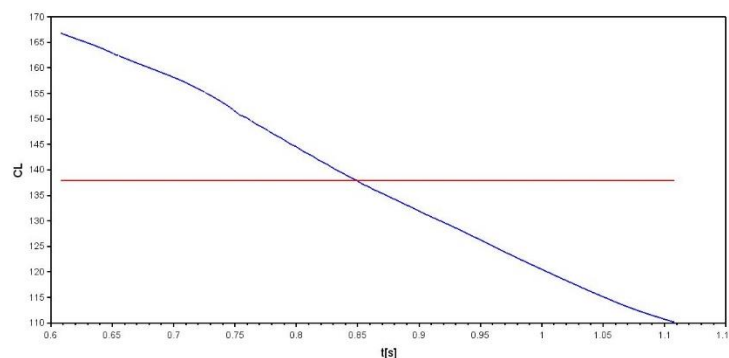
**Figura 29:** Perfil de velocitats mitjanes en la component  $x$  per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un  $-100\%$  el paràmetre  $\alpha^*$ .



**Figura 30:** Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un -200% el paràmetre  $\alpha^*$ .



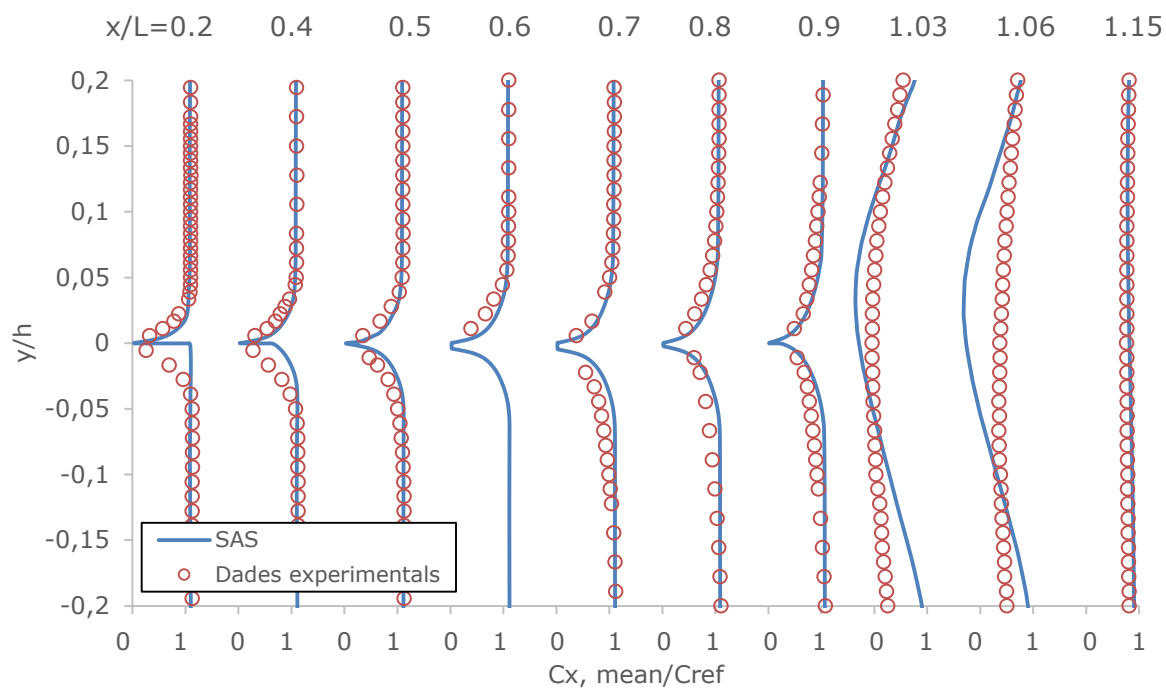
**Figura 31:** Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un -300% el paràmetre  $\alpha^*$ .



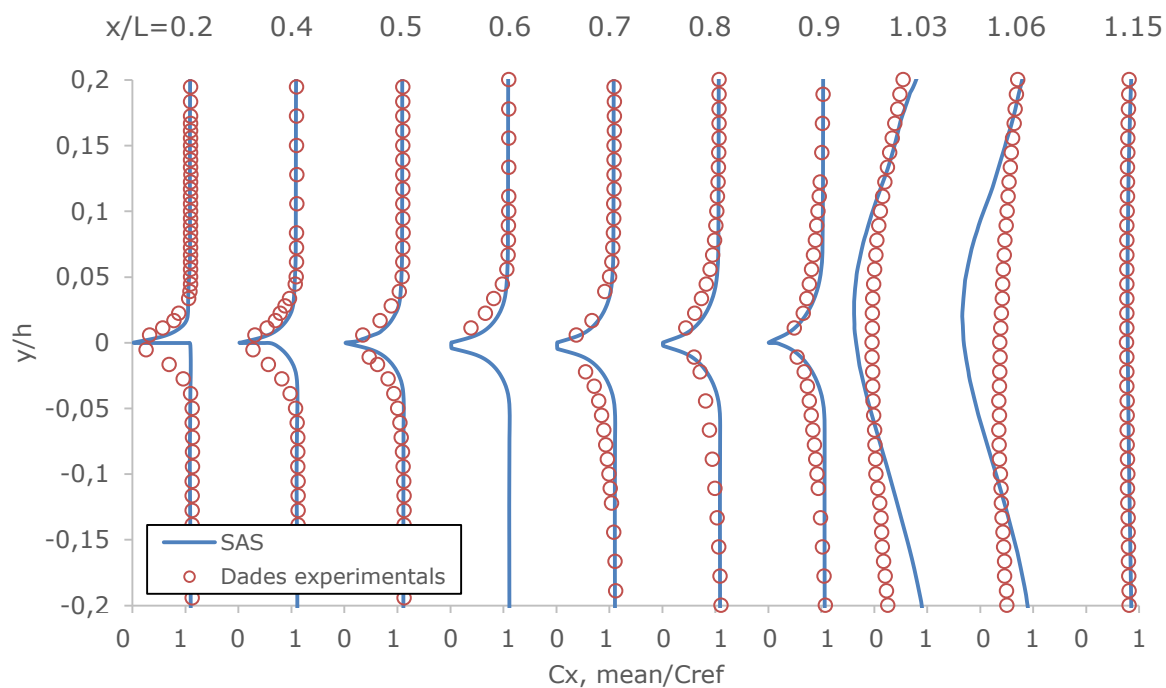
**Figura 32:** Senyal de la força lift per la simulació modificant un -300% el paràmetre  $\alpha^*$ .

Pels casos on s'ha augmentat el paràmetre de dissipació i generació de la turbulència,  $\beta^*$ , els perfils de velocitats s'ajusten més. De totes maneres, quan la  $\beta^*$  s'augmenta un 300% del seu valor inicial, el model dona un perfil de velocitats dolent, Figura 35. En canvi, quan el paràmetre s'augmenta un 100%, Figura 33, el calibratge és molt bo per la zona laminar, acceptable en la zona de transició i dolent a la zona turbulenta. Pel cas on  $\beta^*$  augmenta un 200%, la zona laminar és bona però a mesura que s'acosta a la zona turbulent els perfils de velocitats es van desajustant molt.

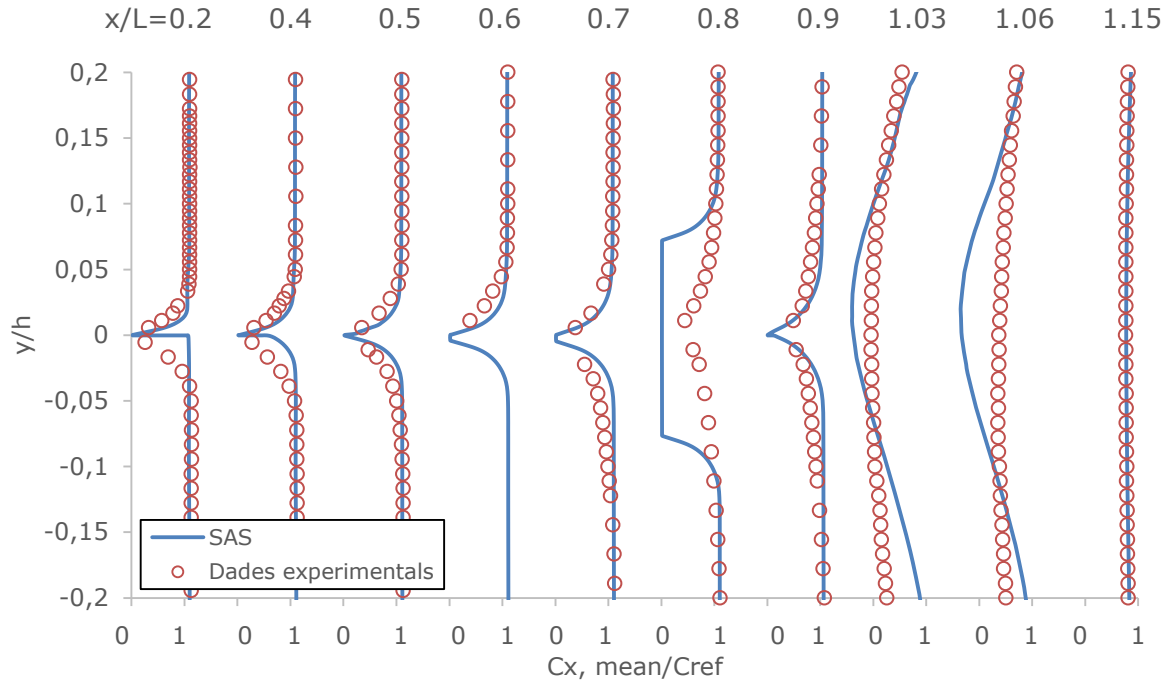
Cal donar importància a l'espessor de la capa límit en augmentar la dissipació i la generació de la turbulència,  $\beta^*$ . Tal i com es pot veure en la Figura 33, la capa límit no augmenta tan com els casos del primer estudi paramètric al llarg de l'àlep. Al 90% del perfil hidrodinàmic l'espessor es troba a la posició 0,075 mentre que pel cas base és 1,75 i pel millor cas de l'estudi paramètric, cas  $\beta^*+100\%$ , és de 1,25. És doncs un paràmetre que com més s'augmenta més dissipa energia cinètica i energia turbulenta i genera energia turbulenta com a conseqüència la capa límit es limita. Quan aquesta es desprèn del truncament, genera vòrtex menys energètics fent la vibració sigui més alta però l'amplitud d'aquesta sigui petita.



**Figura 33:** Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un +100% el paràmetre  $\beta^*$ .



**Figura 34:** Perfil de velocitats mitjanes en la component x per diferents posicions al llarg de l'àlep modificant un +200% el paràmetre  $\beta^*$ .



**Figura 35:** Perfil de velocitats mitjanes en la component  $x$  per diferents posicions al llarg de l'alep modificant un +300% el paràmetre  $\beta^*$ .

Les freqüències de desprendiment de vòrtexs per les simulacions de l'estudi paramètric avançat es troben a la Taula 12. A partir dels resultats, es corrobora la sospita que pels calibratges on  $\alpha^*$  és negatiu són dolents, ja que les freqüències que es detecten són de 4 Hz.

**Taula 12:** Freqüències del desprendiment de vòrtex per l'estudi paramètric avançat a partir de la força *lift* i del caudal volumètric.

	Freqüència mesurada a la força lift (Hz)	Freqüència mesurada en el caudal volumètric (Hz)
$\alpha^* - 100\%$	$1261,79 \pm 4$	$1291,55 \pm 4$
$\alpha^* - 200\%$	$4,0002 \pm 2$	$4,0002 \pm 2$
$\alpha^* - 300\%$	$2,0004 \pm 4$	$2,00004 \pm 4$
$\beta^* + 100\%$	$1307,93 \pm 4$	$1308,95 \pm 4$
$\beta^* + 200\%$	$1236,05 \pm 2$	$1239,05 \pm 2$
$\beta^* + 300\%$	$1208,05 \pm 2$	$1211,05 \pm 2$

Per l'anàlisi de tots els resultats esmentats en aquest subapartat, s'ha realitzat un altre vegada la taula d'errors relatius respecte la freqüència experimental, Taula 13. Per aquest no s'ha tingut en compte l'error de l'instrument de mesura,

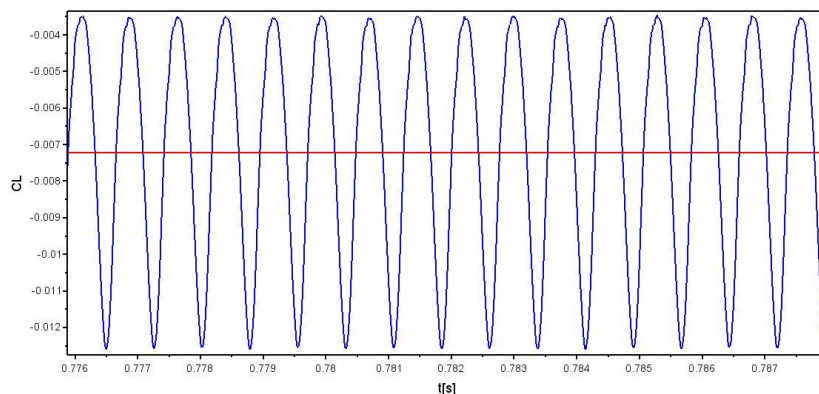
ANSYS FLUENT 15.0, ja que sense comptabilitzar-los s'ha pogut veure clarament quin és el cas més favorable.

Seguint la línia del que es podia intuir observant els perfils de velocitats, el calibratge més bo és el que s'ha augmentat la  $\beta^*$  un +100%. Els errors relatius són els més baixos que s'han obtingut en tot el projecte. També la predicció de la velocitat del fluid i el seu comportament del fluid al llarg de l'àlep tenen un ajust bo en la zona laminar i acceptable a la zona turbulenta. La capa límit per aquest cas té un espessor inferior al que es prediu al cas base fet que genera un desprendiment de vòrtex menys energètic i una vibració més alta.

**Taula 13:** Errors relatius de les freqüències del desprendiment de vòrtex per les simulacions de l'estudi paramètric avançat a partir de la força *lift* i del caudal volumètric respecte la freqüència experimental.

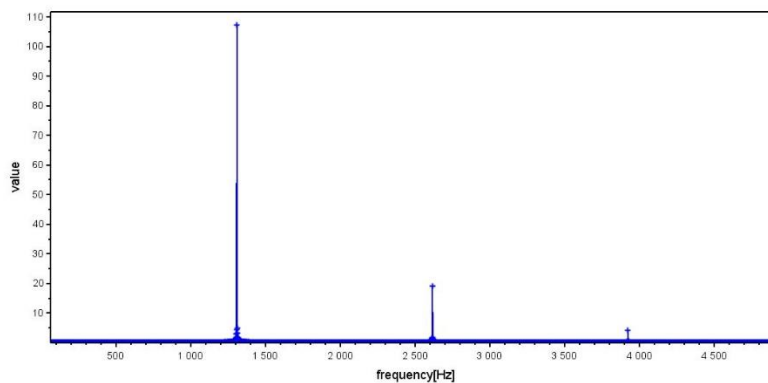
	<i>Errors relatius</i>	
	Freqüència mesurada a la força <i>lift</i>	Freqüència mesurada en el caudal volumètric
$\alpha^* -100\%$	31,42%	29,81%
$\alpha^* -200\%$	99,78%	99,78%
$\alpha^* -300\%$	99,98%	99,98%
$\beta^* +100\%$	28,92%	28,86%
$\beta^* +200\%$	32,82%	32,66%
$\beta^* +300\%$	34,35%	34,18%

Pel cas seleccionat, a la Figura 36 i Figura 37 es poden veure la senyal del *lift* i la freqüència del desprendiment de vòrtex aconseguida a partir de la força de sustentació. La força de sustentació presenta una amplitud de 0.000488 Newtons que és molt similar a la amplitud que s'aconsegueix al cas base.



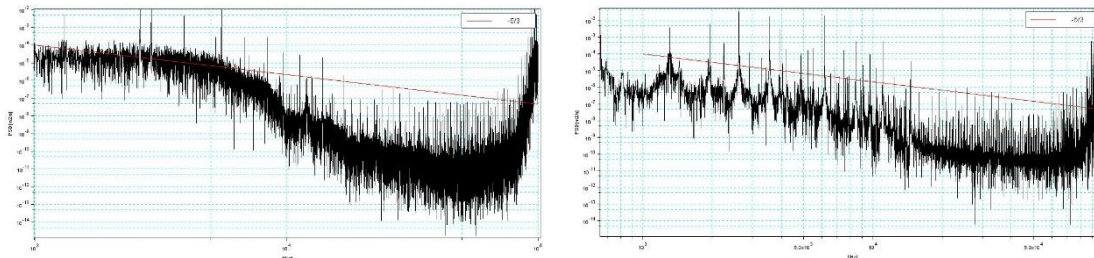
**Figura 36:** Senyal de la força de sustentació, *lift*, pel cas quan  $\beta$  augmenta un 100% el valor inicial.



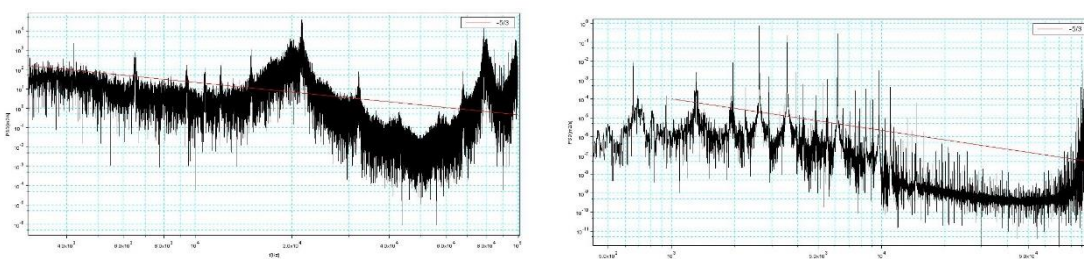


**Figura 37:** Freqüència del desprendiment de vòrtex de la força de sustentació, lift, pel cas quan  $\beta$  augmenta un 100% el valor inicial, gràcies a la transformada de Fourier.

Finalment, es corrobora el comportament del fluid al llarg del perfil i la localització de la zona de transició. Una bona predicció de la zona de transició afavoreix tenir uns resultats més ajustats de la freqüència de desprendiment de vòrtex. Utilitzant el *power spectra density* i comparant el pendent del resultat amb una recta inclinada  $-5/3$ , es pot determinar si el flux és turbulent o no. Tot i ser una valoració qualitativa, a la Figura 38, on es representa el comportament del fluid al 40% de la longitud de l'àlep, es pot veure clarament que la imatge de l'esquerra, que correspon a la zona de succió, no és turbulent mentre que la zona de pressió comença a tenir comportaments turbulents.

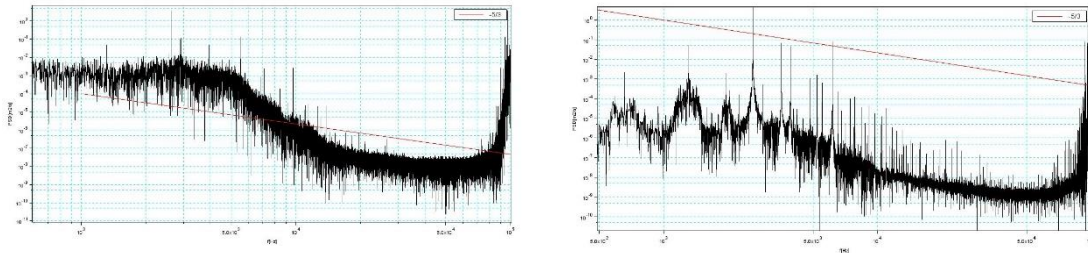


**Figura 38:** Anàlisi del power spectrum density de la fluctuació de la velocitat a la capa límit al 40% de la llargada del perfil hidrodinàmic pel cas  $\beta^* + 100\%$ . Esquerra: zona de succió. Dreta: zona de pressió.

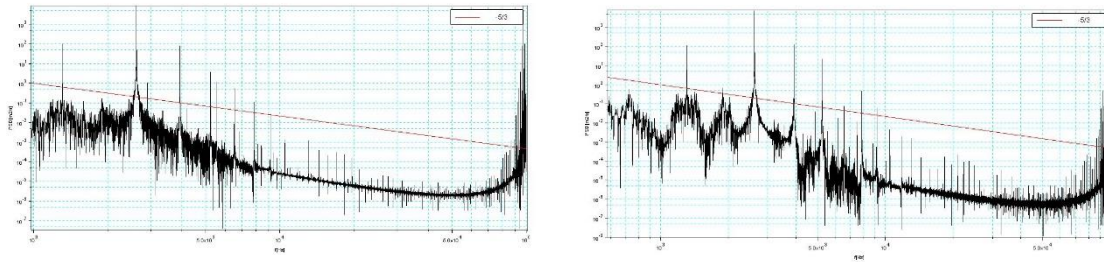


**Figura 39:** Anàlisi del power spectrum density de la fluctuació de la velocitat a la capa límit al 50% de la llargada del perfil hidrodinàmic pel cas  $\beta^* + 100\%$ . Esquerra: zona de succió. Dreta: zona de pressió.





**Figura 40:** Anàlisis del power spectrum density de la fluctuació de la velocitat a la capa límit al 70% de la llargada del perfil hidrodinàmic pel cas  $\beta^* +100\%$ . Esquerra: zona de succió. Dreta: zona de pressió.



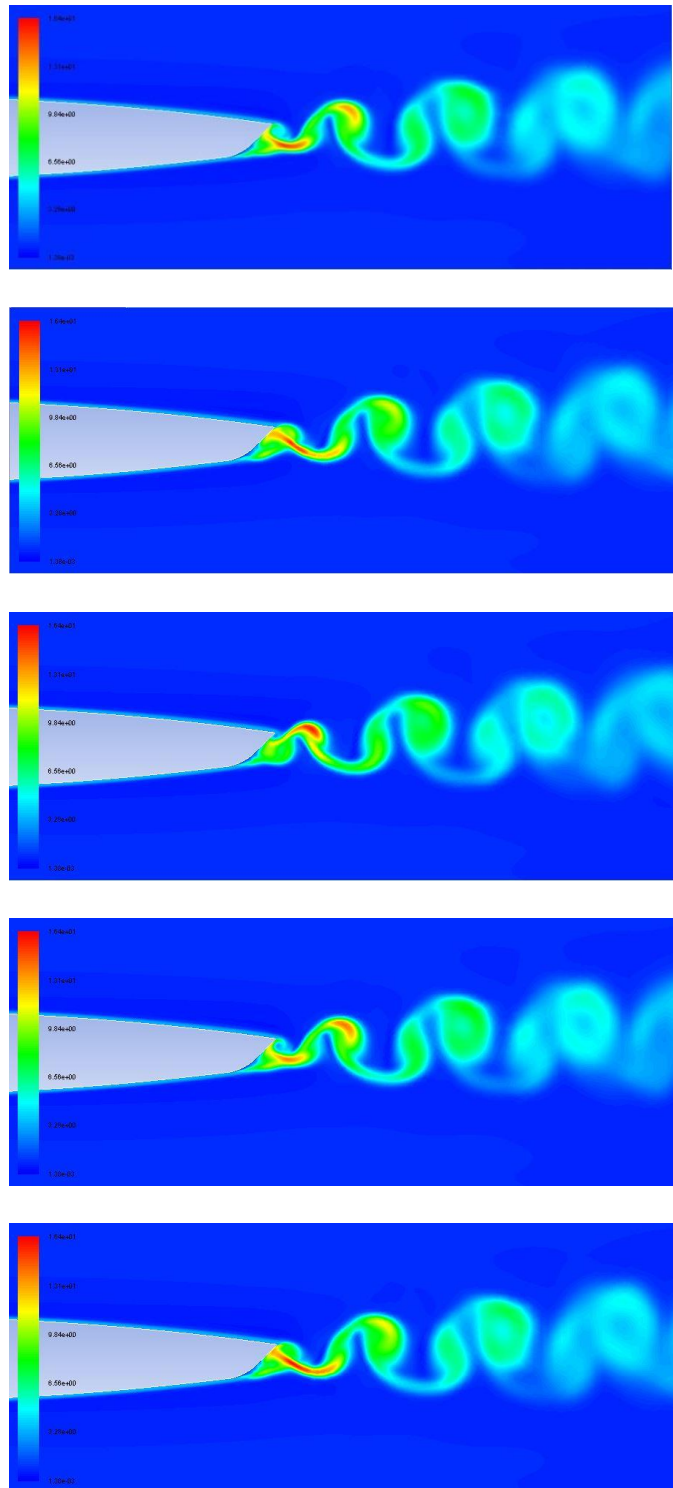
**Figura 41:** Anàlisis del power spectrum density de la fluctuació de la velocitat a la capa límit al 90% de la llargada del perfil hidrodinàmic pel cas  $\beta^* +100\%$ . Esquerra: zona de succió. Dreta: zona de pressió.

Tal com s'ha dit durant el anàlisis del perfil de velocitats, el fluid es comporta diferent a la zona de succió i a la zona de pressió. El fluid és laminar fins el 50% de la llargada del perfil per la banda de succió a partir del 70% el seu comportament ja ha canviat a turbulent. Per tant, segons Figura 39 i Figura 40 la zona de transició transcórrer durant el 50% i el 70% a la banda de succió.

En canvi, la zona de pressió és laminar a l'inici de la nostra captura de dades fins el 40% de la llargada del perfil. D'aquesta manera doncs, la transició per aquesta banda està entre el 40% i el 50%.

Just en acabar el truncament, Figura 41, el comportament per ambdues bandes és totalment turbulent ja que segueix el pendent de la línia de  $-5/3$  d'inclinació.

Finalment s'ha volgut captura l'evolució temporal de la intensitat de turbulència pel cas quan  $\beta^*$  s'augmenta un 100%, Figura 42. En comparació a la Figura X, aquest calibratge disminueix la capa límit. També, la dissipació és més ràpida ja que únicament es veuen un màxim de quatre vòrtex definits mentre que pel cas base en són cinc. En termes general, la intensitat de turbulència és més baixa que en el cas base, de totes maneres, el segon vòrtex presenta més turbulència que pel cas base.



**Figura 42:** Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas base.

# Capítol 5:

## ESTUDI AMBIENTAL

Per la realització d'aquest estudi s'han emès diferents gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera. L'impacte ambiental que es produeix és la conseqüència directa del consum energètic que s'ha generat per realitzar el projecte. Bàsicament s'ha comptabilitzat les emissions de CO<sub>2</sub> que ha generat el consum elèctric dels processadors utilitzats. També s'ha addicionat 30% més de potència per calcular les emissions referents al consum energètic de les màquines de refrigeració de la sala dels processadors. Pel càlcul d'aquest tan per cent s'ha extrapolat la potència que requereix el CESGA amb la potència computacional que té el CESCA, [9].

Tot i haver-hi diferents gasos d'efecte hivernacle que s'emeten en fer ús d'energia elèctrica, només s'ha tingut en compte els emissions de CO<sub>2</sub>. Les emissions relatives s'han extret del mix energètic de l'any 2014 proporcionat pel Departament del Territori i Sostenibilitat,[10].

Les emissions totals de CO<sub>2</sub> pel present estudi són de 847,59 Kg, Taula 14.

**Taula 14:** Càlcul de les emissions de CO<sub>2</sub>.

Número d'hores	1174 h
Número processadors	16
Refrigeració	30%
Consum processador	130 W
Consum refrigeració	39 W
Emissions relatives de CO <sub>2</sub> (2014)	0.267 kg/kWh
<b>Emissions TOTALS</b>	<b>847,59 kg CO<sub>2</sub></b>

## **Capítol 6:**

# **CONCLUSIONS**

Gràcies a la simulació amb CFD, s'ha constatat que el model de turbulència SAS és una bona eina per modelitzar el comportament del fluid a la capa límit i al deixant d'un àlep amb truncament Donaldson. Al mateix temps, amb la primera simulació realitzada, cas base, s'ha comprovat que el model SAS pot millorar-se amb l'objectiu d'obtenir un millor ajust del model al comportament turbulent de l'àlep hidrodinàmic. Aquesta millora s'ha aconseguit calibrant el model a partir del paràmetre de la dissipació de la turbulència.

El software ANSYS FLUENT 15.0 ha resultat ser una gran eina de simulació del pel truncament Donaldson. A partir d'ell s'han obtingut dades fonamentals per la comparació i millora del calibratge com són dades de velocitats mitjanes a la capa límit de l'àlep i freqüències de despreniment de vòrtex.

Valorant els resultats obtinguts en totes les simulacions, es pot afirmar que el model de turbulència SAS persistentment prediu molt acuradament la zona laminar però té problemes en la transició i la zona turbulent. El model simula bé la diferència entre la zona transició de la zona de succió i de pressió. Els resultats experimentals van demostrar que a la banda de succió es troba després de la zona de transició a la banda de pressió. Aquest fet és degut a la geometria del truncament, ja que per la banda de pressió la capa límit es desprèn abans i es genera el primer vòrtex anteriorment a la banda de succió.

Per la majoria dels casos, l'espessor de la capa límit es sobredimensiona. La causa és deguda a que el model troba la zona de transició molt abans que el comportament real del truncament Donaldson, al 40%. Si es sobredimensiona la zona de transició significa que hi ha més zona turbulenta, la qual en arribar al deixant, generarà una vibració baixa i amplitud alta. Aquest comportament no és bo per l'àlep, sempre s'intentarà que la vibració sigui d'alta freqüència i d'amplitud baixa.

Amb la realització d'aquest projecte s'ha conclòs que el model de turbulència SAS té una modelització dolenta quan la constant  $\alpha^*$  és inferior o igual a 0. Així doncs, aquesta constants sempre haurà de ser positiva.

Concretant en el cas d'estudi, el millor calibratge seria aquell que minimitzés l'amplitud de la vibració de l'àlep i augmentés la freqüència. D'aquesta manera la freqüència de despreniment de vòrtex s'allunyaria de la freqüència natural de l'àlep evitant la ressonància.

Aquestes característiques es compleixen pel calibratge quan s'augmenta el paràmetre que dissipa l'energia cinètica i dissipa i genera l'energia turbulenta. Trobar el valor òptim d'aquest paràmetre en el model assegura un equilibri entre la generació i dissipació de la turbulència pel que la freqüència de despreniment de vòrtex és més alta i l'amplitud més baixa. També, per aquest calibratge, el perfil de velocitats s'ajusta a les velocitats experimentals en la zona laminar i, comparat amb els altres casos, aconsegueix la millor semblança a la zona de transició i de turbulència. Comparant les freqüències de despreniment de vòrtex, aquest calibratge s'ajusta un 5,87% més a les dades experimentals que el cas base.

En pròxims projectes es podria calibrar el model SAS per aconseguir una bona localització de la zona de transició. Aquest estudi es realitzaria modificant la constant  $C_s$  del model. Aquest punt seria de vital importància per poder ajustar la l'espessor a la capa límit i també els perfils de velocitats.

També es podria realitzar un estudi similar a l'existent però ajustant més el paràmetre  $\beta^*$ . S'ha demostrat que el valor òptim es troba entre la franja quan el paràmetre augmenta entre el 10% i el 100%.

Data: Barcelona, Juny del 2015.

Firma: Maria Vilardell Rigau

# Capítol 7:

## BIBLIOGRAFIA

### 7.1. Referencies bibliogràfiques

- [1] P. a C. Rocha, H. H. B. Rocha, F. O. M. Carneiro, M. E. Vieira da Silva, and a. V. Bueno, "K- $\omega$  SST (shear stress transport) turbulence model calibration: A case study on a small scale horizontal axis wind turbine," *Energy*, vol. 65, pp. 412–418, 2014.
- [2] D. Arbeláez and O. D. Lopez, "Comparación de Diferentes Modelos de Turbulencia en Aplicaciones Aerodinámicas," pp. 12–13, 2011.
- [3] J. H. Lienhard, "Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders," *Bulletin 300*. pp. 1–32, Washington State University, 1966.
- [4] "Análisis experimental del desprendimiento de vórtices de Kármán." [Online]. Available: <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2001/7-Tecnologicas/T-023.pdf>. [Accessed: 21-May-2015].
- [5] A. Zobeiri, "Effect of Hydrofoil Trailing Edge Geometry on the Wake Dynamics," vol. 5218, 2012.
- [6] Y. Egorov and F. Menter, "Development and application of SST-SAS turbulence model in the DESIDER project," *Notes Numer. Fluid Mech. Multidiscip. Des.*, vol. 97, pp. 261–270, 2008.
- [7] Y. Egorov and F. Menter, "Development and Application of SST-SAS Turbulence Model in the DESIDER Project Outline • Scale-Adaptive Simulation ( SAS ) concept • SST-SAS turbulence model • Aerodynamic

applications – NACA0021 airfoil beyond stall – Delta wing – Full aircraft configura,” pp. 1–23, 2007.

- [8] a Zobeiri and P. Ausoni, “Vortex shedding from blunt and oblique trailing edge hydrofoils,” *3rd IAHR Int. ...*, vol. 9257, no. 3, pp. 245–252, 2009.
- [9] J. L. Cacheiro, C. F. Sánchez, J. I. López, P. Rey, A. Feijoo, and S. Díaz, “Eficiencia energética en un centro de supercomputación Energy efficiency in a supercomputing centre.”
- [10] D. E. G. Amb and E. D. Hivernacle, “Índex,” pp. 0–101, 2015.

## 7.2. Bibliografia de consulta

*Comparación de Diferentes Modelos de Turbulencia en Aplicaciones Aerodinámicas. Daniel. Arbeláez, Omar D. Lopez. 2011. Medellín : s.n., 2011.*

*Development and application of SST-SAS Turbulence Model in the DESIDER Project. Y. Egorov, F. Menter. 2007. 2007.*

**FLUENT, ANYS.** *User and theoretical guides ANSYS FLUENT.*

**García, Alfred Fontanals. 2012.** *Caracterització del flux a causa de la interacció.* Barcelona : s.n., 2012.

*MODELOS DE TURBULENCIA EN MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL. Solorio, Gerardo Ruiz. 2014. México D.F : s.n., 2014.*

*Scale Adaptive Simulation (SAS) Turbulence Modeling. Virdung, F.R. Menter and Torbjorn. 2011. 2011.*

**Zabaleta, Alfredo Guardo. 2007.** *Computational Fluid Dynamics Studies in Heat and Mass Transfer.* Barcelona : s.n., 2007.

**Zobeiri, Amirreza. 2012.** *Effect of Hydrofoil Trailing Edge Geometry on the Wake.* Lausanne : s.n., 2012.







Escola Universitària d'Enginyeria  
Tècnica Industrial de Barcelona  
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## Annexos

# **“Estudi CFD del flux turbulent al voltant d'àleps de turbomàquines amb model SAS”**

TFG presentat per optar al títol de GRAU en  
ENGINYERIA de l'Energia  
per **Maria Vilardell Rigau**

Barcelona, 9 de Juny de 2015

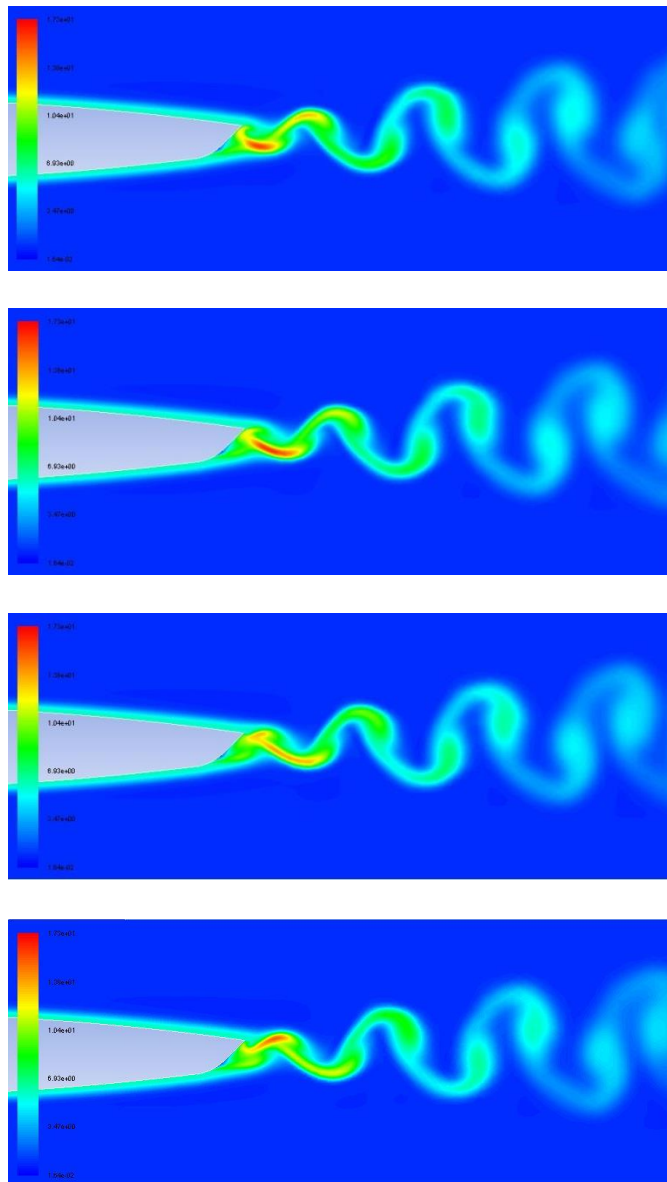
Director: Alfredo Guardo Zabaleta  
Departament MF (729)  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

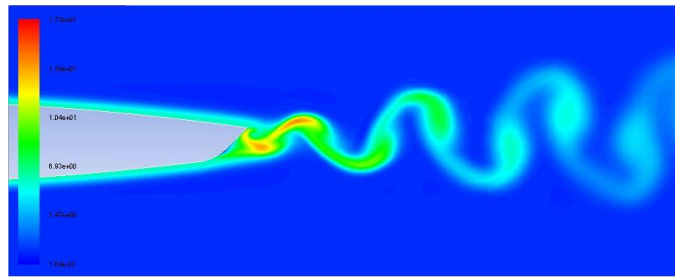


# **I. COMPARATIVA INTENSITATS DE TURBULÈNCIA PER L'ESTUDI PARAMÈTRIC**

S'ha simulat la propietat de la intensitat de turbulència del fluid en els diferents casos per l'estudi paramètric. La seqüència d'imatges per cada cas representa l'evolució de l'estela. L'escala de la llegenda és igual per tots els casos així que es pot comparar adequadament.

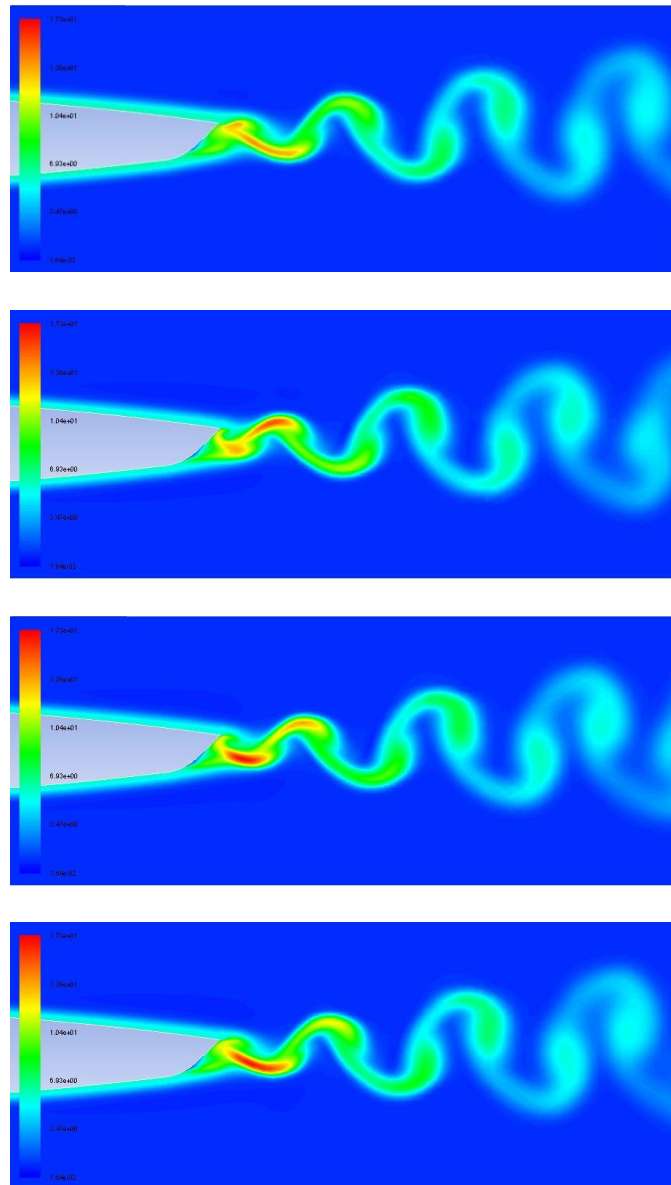
La Figura 43 mostra com evoluciona la intensitat de turbulència quan  $\alpha^*$  es disminueix un 10% el seu valor.

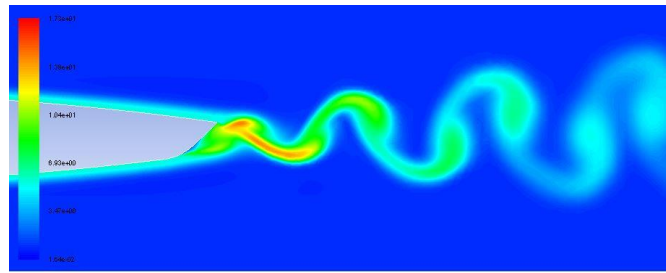




**Figura 43:** Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas  $\alpha^* -10\%$ .

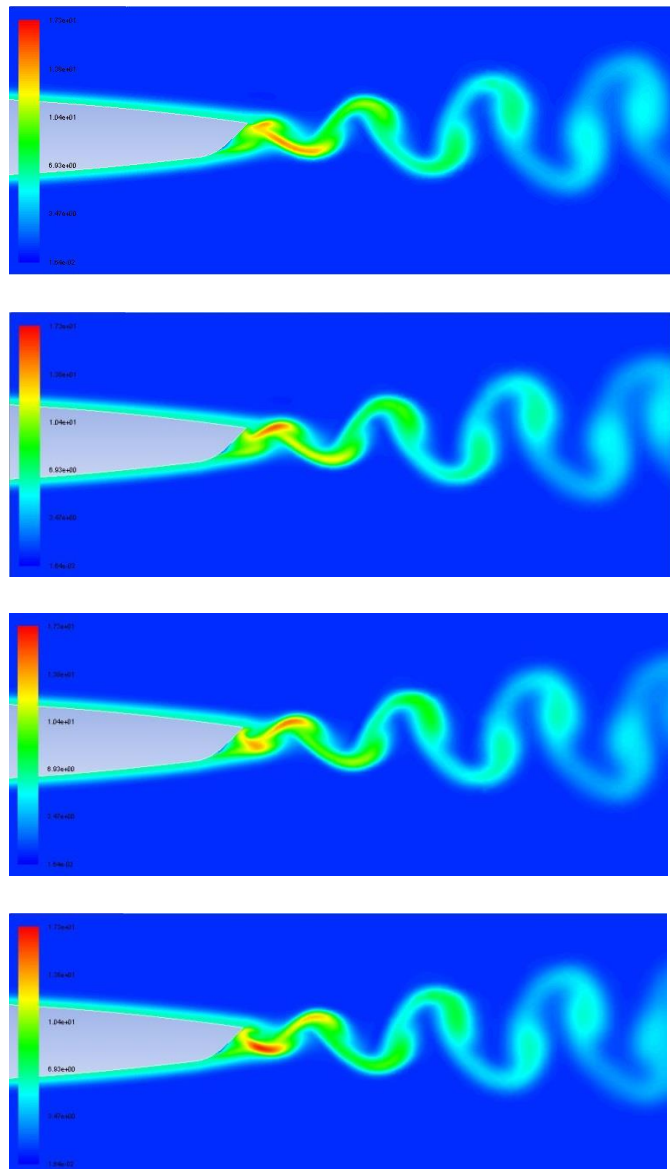
Quan aquest mateix paràmetre s'augmenta un 10%, Figura 44, la capa límit augmenta considerablement i el desprendiment de vòrtex té més turbulència.

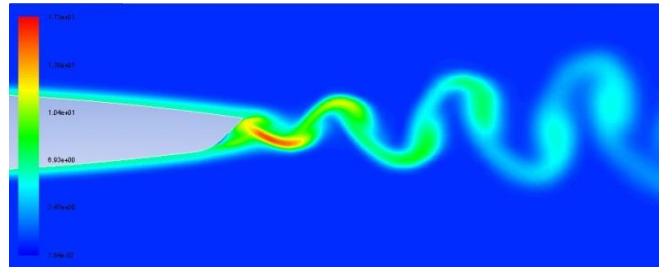




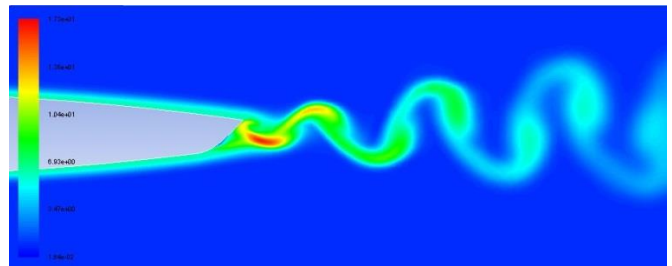
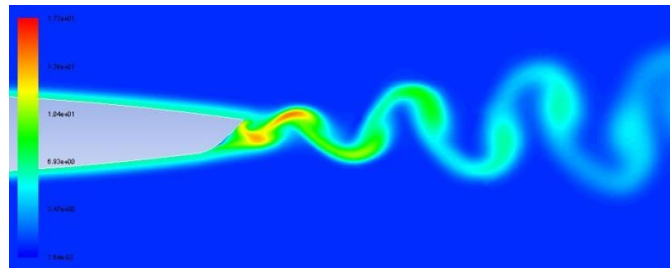
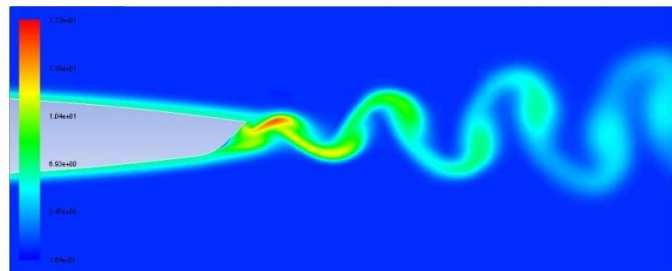
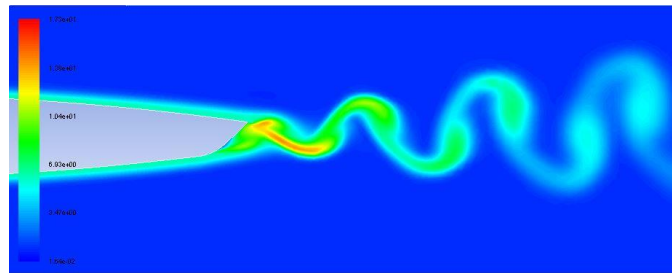
**Figura 44:** Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas  $\alpha^* + 10\%$ .

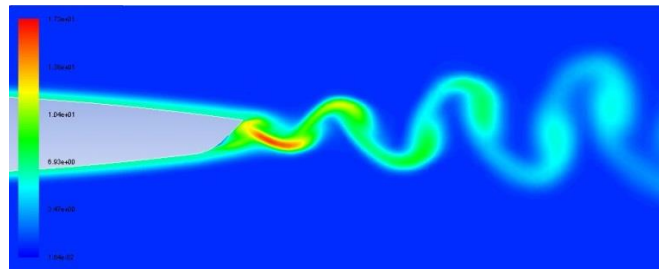
La Figura 45 i Figura 46 es pot veure la intensitat de turbulència quan  $\beta^*$  es canvia un  $-10\%$  i  $+10\%$  del seu valor respectivament. Entre aquestes dues figures les diferències no són apreciables, però sí que ho són quan es comparen amb els casos anteriors. Quan el paràmetre  $\beta^*$  es modifica, l'estela té menys intensitat de turbulència que en els casos quan  $\alpha^*$  es varia.





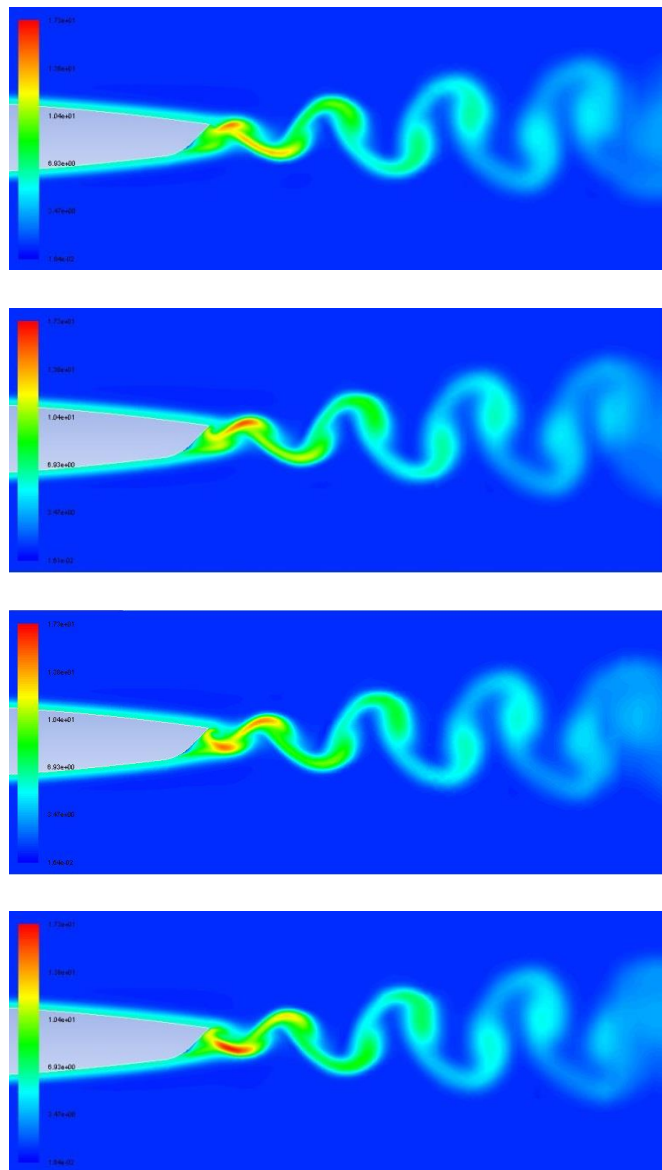
**Figura 45:** Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas  $\beta^*$  -10%.





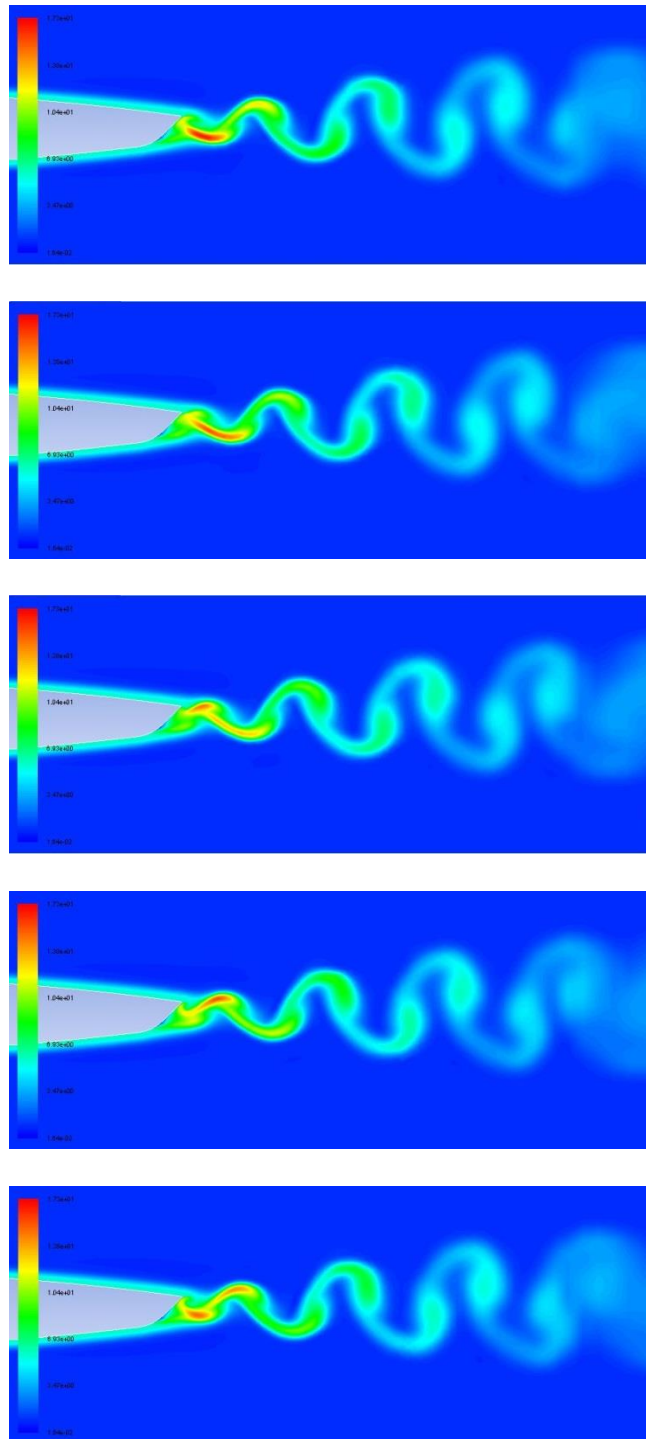
**Figura 46:** Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas  $\beta^* +10\%$ .

Finalment, a la Figura 47 i 48 es pot observar l'evolució de la intensitat de turbulència pels casos quan es modifica el paràmetre que defineix la localització de la zona de turbulència, Cs.



**Figura 47:** Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas Cs -10%.





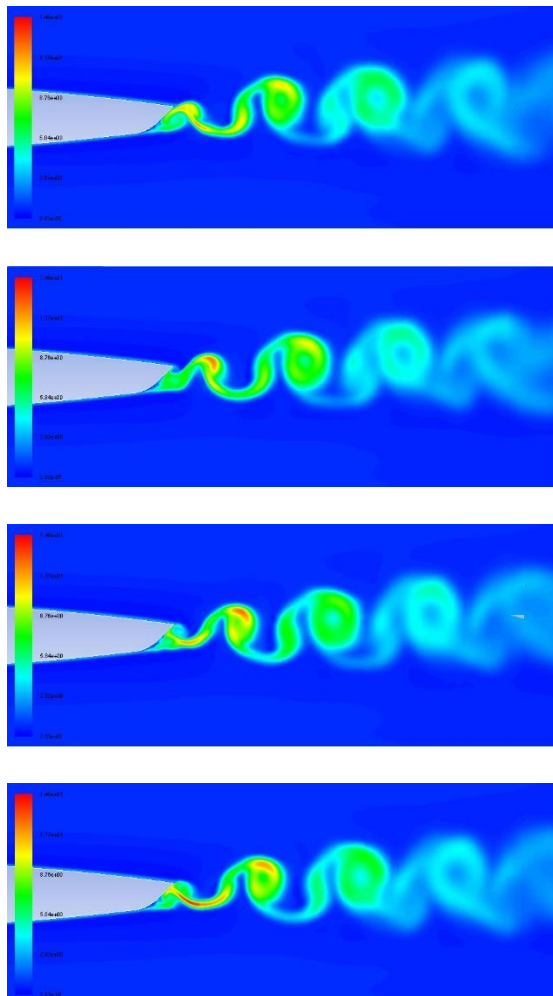
**Figura 48:** Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas  $C_s + 10\%$ .

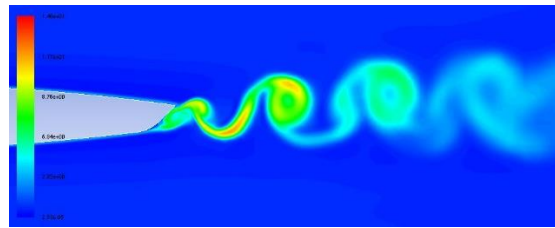


## II. COMPARATIVA INTENSITAT DE TURBULÈNCIA DE L'ESTUDI PARAMÈTRIC AVANÇAT

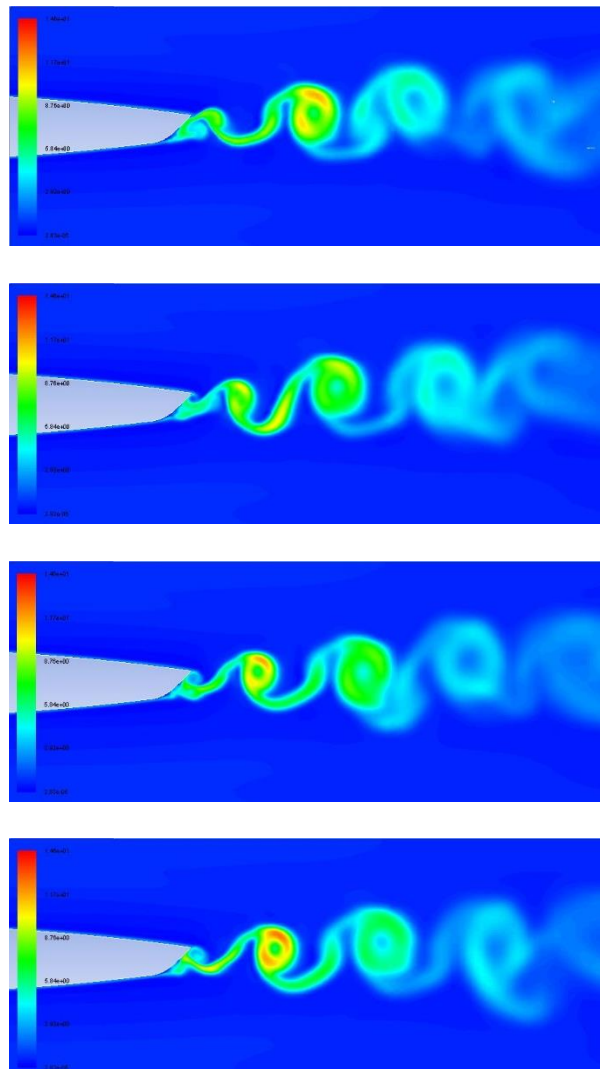
En aquest apartat només s'han inclòs les figures que corresponen als casos quan  $\beta^*$  s'ha augmentat un 200% i 300% ja que pels casos on s'ha disminuït el paràmetre  $\alpha^*$  els calibratges eren dolents. La Figura 49 mostra l'evolució de la intensitat de turbulència quan  $\beta^*$  s'ha augmentat un 200% i la Figura 50 l'evolució quan  $\beta^*$  s'ha augmentat un 300%.

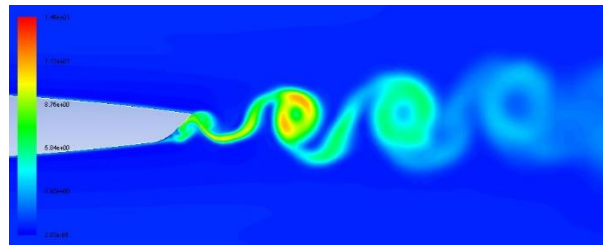
Inicialment es pot veure que els resultats d'aquest apartat i l'anterior, Annex I, tenen uns valors de turbulència inferiors. La llegenda per aquest cas està entre els valors  $2,83 \cdot 10^{-05}$  i  $1,46 \cdot 10^{+01}$ , mentre que pels casos de l'apartat anterior l'escala es troba entre els valors  $1,64 \cdot 10^{-02}$  i  $1,73 \cdot 10^{+01}$ . Així doncs, es corrobora que augmentant la  $\beta^*$  es disminueix la turbulència. Comparant els dos casos, Figura 49 i Figura 50, com més augmenta el valor de  $\beta^*$  més s'allunya el tercer vòrtex i més intens és.





**Figura 49:** Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas  $\beta^* +200\%$ .





**Figura 50:** Captures en diferents instants de la intensitat de turbulència pel cas  $\beta^* +300\%$ .





Escola Universitària d'Enginyeria  
Tècnica Industrial de Barcelona  
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**Pressupost**



# **“Estudi CFD del flux turbulent al voltant d’àleps de turbomàquines amb model SAS”**

TFG presentat per optar al títol de GRAU en  
ENGINYERIA de l'Energia  
per **Maria Vilardell Rigau**

Barcelona, 9 de Juny de 2015

Director: Alfredo Guardo Zabaleta  
Departament MF (729)  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)



És interessant veure quin ha sigut el cost econòmic que ha generat la realització del present projecte. En aquesta secció es calcula el pressupost i es desglossa com si hagués sigut una oficina tècnica la que ho hagués realitzat. Així doncs, bàsicament es tenen en compte factors com la mà d'obra d'enginyers i els recursos informàtics utilitzats. Però també, s'ha aplicat un 21% d'IVA i 14.7% d'A.U.I. (administració, utilitats i imprevistos) sobre la base imposable total, Taula 16.

Per fer una valoració econòmica s'han tingut en compte tots els factors que han intervingut en cada pas del procés. A la Taula 15 es pot veure desglossat la base imposable segons els diferents conceptes considerats.

El cost dels recursos informàtics de CESCO s'han estimat per valor de 2,80€/hora tenint en compte que el preu per hora i processador és de 0,05€ i s'utilitzen 16 processadors. El preu de la llicència és de 80.000€/any tenint en contracte a 5 llocs de treball. S'han estimat les hores de les simulacions posant com a base que per cada simulació de 50.000 time steps es necessiten 50 hores i que per cada estabilització, 10.000 time steps, en són 10.

També, s'ha tingut en consideració la llicència del programa de simulació ANSYS FLUENT 15.0. El seu cost és molt elevat però s'ha utilitzat una llicència d'ús acadèmic que té un preu més reduït de 6.000€ l'any. Aquest correspon a 0,69€ la hora.

**Taula 15:** Base imposable desglossada.

Concepte	Quantitat	Preu unitari	Import
<i>Recurs CESCO</i>	<i>1.174 h</i>	<i>2,80 €/hora</i>	<i>3.287,2 €</i>
<i>Mà d'obra enginyer</i>	<i>250 h</i>	<i>75 €/hora</i>	<i>18.750 €</i>
<i>Consum energètic</i>	<i>250 h</i>	<i>0,02 €/hora</i>	<i>5 €</i>
<i>Llicència ANSYS FLUENT</i>	<i>50</i>	<i>0,69 €/hora</i>	<i>34,50 €</i>
<b>Base imposable</b>			<b>22.076,70 €</b>

**Taula 16:** Import final del pressupost després d'haver aplicat taxes.

	%	Base imposable actualitzada
<i>A.U.I</i>	<i>14,7</i>	<i>25.321,97 €</i>
<i>I.V.A</i>	<i>21</i>	<b>30.639,59 €</b>